

ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL CUERPO DE AHMED MEDIANTE DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL

ELABORADO POR:

Brayan Esteveen Galeano Galviz
Anderson Aguirre Cardona

MODALIDAD:

TRABAJO DE INVESTIGACION FORMATIVA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MARZO 2020

ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL CUERPO DE AHMED MEDIANTE DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL

ELABORADO POR:

Brayan Esteveen Galeano Galviz
Anderson Aguirre Cardona

MODALIDAD:

Trabajo de investigación formativa como requisito para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Director

Msc. CARLOS ANDRES MESA MONTOYA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MARZO 2020

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, marzo de 2020

UTP

*Brayan Esteveen Galeano Galviz
Anderson Aguirre Cardona*

Contenido

CAPÍTULO 1 Introducción	10
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 Justificación.....	13
CAPÍTULO 2 Principios y ecuaciones fundamentales.....	14
2.1 Conceptos básicos	15
2.1.1 Coeficiente de arrastre y elevación.....	16
2.1.2 Capa limite.....	17
2.1.3 Numero de Reynolds	20
2.1.4 Centro de presión.....	20
2.1.5 Numero de Mach	21
2.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)	21
2.2.1 Ecuaciones fundamentales.....	23
2.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes (NS).....	24
2.2.3 Modelos de turbulencia	25
2.3 Metodología	27
CAPÍTULO 3 Dominio computacional y condiciones de frontera	28
3.1 Descripción geométrica del modelo	29

3.2 Dimensiones generales	30
3.3 Estrategias de mallado.....	31
3.3.1 Estrategia A (Adaptación)	32
3.3.2 Estrategia B (Cajas)	32
3.3.3 Estrategia C (Controles)	33
3.3.4 Elementos	33
3.3.5 Parámetros	39
3.4 Calidad de la malla	42
3.4.1 Calidad ortogonalidad de la malla	43
3.4.2 Calidad “skewness” (oblicuidad) de la malla	45
3.5 Condiciones de frontera	47
CAPÍTULO 4 Resultados	50
4.1 Convergencia numérica.....	50
4.3 Coeficiente de arrastre.....	52
4.4 Contornos de presión.....	54
4.5 Campo de velocidades.....	57
4.6 Resultados comparativos.....	60
CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones.....	64
BIBLIOGRAFÍAS	65

Contenido de figuras

Figura 1. Diferencial de presión creado por un ala en vuelo [4]	16
Figura 2. Fuerza de arrastre y elevación. Fuerza de arrastre y elevación [5]	16
Figura 3. Vectores de velocidad del aire en aumento en la capa límite [4]	18
Figura 4. Características del flujo viscoso estable que pasa por una placa lisa [4]	19
Figura 5. Características del flujo en la capa límite [7]	19
Figura 6. Centro de presión [4]	21
Figura 7. (a) Aumento de la potencia informática en los primeros años; (b) Capacidades actuales y proyectadas [7]	22
Figura 8. Flujo de trabajo.....	27
Figura 9. Modelo de Ahmed, dimensiones en [mm]	30
Figura 10. Dimensiones de los volúmenes de control en [mm].....	30
Figura 11. Dimensiones volúmenes de control, dimensiones en [mm]	31
Figura 12. Volumen de control	31
Figura 13. Uso de tetraedros en la malla computacional del vehículo	34
Figura 14. Zona de refinamiento de tamaño 10 mm.....	35
Figura 15. Zona de refinamiento de tamaño 15 mm.....	35
Figura 16. Detalle de prismas en las paredes del cuerpo	37
Figura 17. Generación de prismas en la malla computacional.	37
Figura 18. Capa piramidal de la malla computacional del vehículo.....	38
Figura 19. Conformación de una malla híbrida [12]	39
Figura 20. Estimación de la longitud de referencia de la malla de superficie [11]	40
Figura 21. Malla computacional con inflación [12]	41
Figura 22. Malla computacional con mejor resolución de la inflación	41

Figura 23. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 5°	44
Figura 24. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de $12,5^{\circ}$	44
Figura 25. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 30°	45
Figura 26. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 5°	46
Figura 27. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de $12,5^{\circ}$	46
Figura 28. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 30°	47
Figura 29. Condiciones de frontera.....	48
Figura 30. Convergencia del análisis aerodinámico ángulo 5°	51
Figura 31. Convergencia del análisis aerodinámico ángulo $12,5^{\circ}$	51
Figura 32. Convergencia del análisis aerodinámico Angulo 30°	51
Figura 33. Coeficiente de arrastre para el ángulo de 5°	52
Figura 34. Coeficiente de arrastre para el ángulo de $12,5^{\circ}$	53
Figura 35. Coeficiente de arrastre para el ángulo de 30°	53
Figura 36. Distribución de presión en el vehículo de ángulo 5°	54
Figura 37. Distribución de presión en el vehículo de ángulo $12,5^{\circ}$	55
Figura 38. Distribución de presión en el vehículo de ángulo 30°	56
Figura 39. Contorno de presión del vehículo ángulo 5°	56
Figura 40. Contorno de presión del vehículo ángulo $12,5^{\circ}$	57
Figura 41. Contorno de presión del vehículo ángulo 30°	57

Figura 42. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de 5°	58
Figura 43. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo	58
Figura 44. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de $12,5^\circ$	59
Figura 45. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo	59
Figura 46. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de 30°	60
Figura 47. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo	60
Figura 48. Comparación entre contornos de presión y campos de velocidad.....	62

Contenido de tablas

Tabla 1. Descripción de diversos modelos de turbulencia [3]	26
Tabla 2. Cantidad de elementos y nodos.....	36
Tabla 3. Calidad de celdas en la malla computacional [13].....	42
Tabla 4. Clasificación estadística de la calidad ortogonal [13].....	43
Tabla 5. Clasificación estadística de la oblicuidad [13].....	43
Tabla 6. Resumen de las condiciones de frontera aplicadas en el modelo	49
Tabla 7. Valores comparativos.....	60

CAPÍTULO 1

Introducción

La Facultad de Ingeniería Mecánica con el apoyo del grupo de investigación en Procesos de Manufactura y Diseño de Máquina, en conjunto con El grupo de investigación de Tecnología Mecánica se encuentra trabajando en el proyecto “Diseño y construcción virtual de un vehículo eléctrico utilitario”, el cual busca generar una alternativa funcional y utilitaria de transporte de carga o pasajeros, que involucre el estudio, diseño y análisis de cada uno de los sistemas que conforman un vehículo.

El diseño actual de los vehículos automotrices requiere en su etapa conceptual, el conocimiento necesario para identificar el comportamiento del fluido alrededor de su carrocería y definir que configuraciones morfológicas le permitirán un mayor control del flujo del aire circundante. La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite analizar la velocidad del vehículo, las fuerzas de arrastre y definir su impacto en el consumo de potencia, con un menor costo asociado a ensayos experimentales y menor tiempo de ejecución.

Teniendo en cuenta lo anterior, la comunidad académica a adoptado el modelo simplificado de Ahmed (que cuenta con una morfología relativamente simple), el cual permite analizar directamente la influencia del comportamiento del flujo en aspectos del diseño tales como: a) mínimo consumo de combustible, b) disminución del ruido, c) mejoramiento del confort y d) utilización eficiente del viento como medio de enfriamiento de la unidad motriz.

1.1 Planteamiento del problema

El diseño de la carrocería existente contempla una base estructural y ergonómicamente confiable, así como la incorporación de algunos elementos aerodinámicos. Estos elementos al interactuar con el fluido generan fuerzas aerodinámicas que son el resultado de complicadas interacciones entre las separaciones de la capa límite y un conjunto de vórtices que se desarrollan en la estela del flujo, el cual es un efecto directamente relacionado con el ángulo de inclinación del extremo trasero del vehículo. Computacionalmente estos sucesos requieren alto costo, por lo que es necesario estudiar estos efectos en modelos simplificados que permitan reproducir los comportamientos principales del fluido alrededor de los vehículos y precisar un punto de partida para el desarrollo y verificación de las condiciones de frontera definidas para la morfología final.

Se propone entonces, estudiar los métodos y procedimientos aplicados al cuerpo de Ahmed que permitan comprender las complicadas interacciones en el flujo, de tal forma que los resultados obtenidos permitan mejorar el control del flujo en la carrocería existente, y hagan que el vehículo sea más eficiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento aerodinámico del cuerpo Ahmed mediante simulación computacional, con el fin de determinar la influencia de los parámetros geométricos en el arrastre de un vehículo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar los conceptos sobre la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), enfocados a la aerodinámica automotriz.
- Definir los aspectos dimensionales y morfológicos del cuerpo de Ahmed, teniendo en cuenta su aplicación en la aerodinámica automotriz.
- Establecer una estructura metodológica para el estudio computacional del cuerpo de Ahmed, cuantificando las variables aerodinámicas propias del fluido circundante.
- Analizar los resultados obtenidos mediante CFD con el fin de identificar los parámetros dimensionales que permitan atenuar los efectos del arrastre generado por el fluido.

1.3 Estructura trabajo de grado

Para el desarrollo de este proyecto se realizó una revisión bibliográfica en torno a simulaciones y artículos acerca del modelo de Ahmed, con el fin de establecer sus dimensiones, forma y comportamiento principal del flujo alrededor del modelo.

Luego de la revisión bibliográfica realizada se procede con la conceptualización sobre los principios fundamentales de la dinámica de fluidos computacional, y más específicamente de la aerodinámica automotriz.

Posteriormente se realizará el modelo digital del cuerpo de Ahmed. Se configurarán las propiedades y condiciones de flujo asociados al fluido circundante. También, se realizará la simulación por medio de CFD para el cuerpo de Ahmed teniendo en cuenta un mallado adecuado, la selección de condiciones de frontera en el volumen de control, el modelo de turbulencia que mejor se ajuste a la aplicación planteada y la configuración de la etapa de solución que permita la obtención de resultados convergentes mediante la herramienta computacional.

Finalmente, se analizan la influencia de los parámetros dimensionales de interés en los resultados obtenidos, tales como los campos de presión, los campos de velocidad, el coeficiente de arrastre y el comportamiento de la estela del fluido, los cuales brindarán las pautas necesarias que permitirán proponer mejoras en el diseño de vehículos terrestres.

CAPÍTULO 2

Principios y ecuaciones fundamentales

La aerodinámica es el estudio de un cuerpo sólido con movimiento relativo respecto del aire, el cual interactúa con la superficie del cuerpo, modificando la magnitud y dirección de sus velocidades relativas. La aerodinámica de vehículos de carretera aporta otra fuente de complejidad al generar un contorno de flujo turbulento, que incide sobre la velocidad media y fluctuante experimentada en el aire por el movimiento del vehículo. Por lo tanto, esta turbulencia en conjunto con la estela inestable desprendida puede afectar las fuerzas aerodinámicas actuantes sobre el tipo de vehículo analizado.

Los expertos en aerodinámica de vehículos buscan permanentemente respuestas a los objetivos planteados por el cada vez más exigente mercado de consumidores. En tal sentido, las propiedades aerodinámicas son significativas para el rendimiento, conducción, seguridad y confort de los automóviles actuales. Por ejemplo, un bajo valor del coeficiente de arrastre favorece una mayor economía de combustible y disminuye las emisiones de gases, lo que incide en el cuidado del medio ambiente.

Desde el estudio efectuado por Janssen y Hucho en el Congreso de la Volkswagen Golf I de 1975 [1], se puso especial énfasis en observar el efecto que provoca el ángulo de inclinación del extremo trasero sobre el valor de la fuerza de arrastre en modelos simplificados que simulen los comportamientos principales del flujo real.

En 1984 Ahmed [2] y sus colaboradores analizaron un modelo simplificado, con una configuración geométrica simple, libre de aditamentos o accesorios, con superficies suaves, de

tal manera de concentrar la atención en los fenómenos aerodinámicos presentes. El modelo obtenido reproduce bastante bien los comportamientos principales del flujo alrededor de los vehículos y constituye también un punto de partida para el desarrollo y validación de los códigos computacionales específicos al tema.

2.1 Conceptos básicos

El estudio del aire en movimiento y la fuerza que produce se conoce como aerodinámica. Es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento de los gases y de su interacción con los cuerpos circundantes [4]. Está fundamentada en el principio de Bernoulli, el cual establece que a medida que aumenta la velocidad del fluido (aire), la presión disminuye, y a medida que la velocidad disminuye, la presión aumenta como se muestra en la figura 1. El estudio del aire en movimiento y la fuerza que produce se conoce como aerodinámica. Es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento de los gases y de su interacción con los cuerpos circundantes [3]. Está fundamentada en el principio de Bernoulli, el cual establece que a medida que aumenta la velocidad del fluido (aire), la presión disminuye, y a medida que la velocidad disminuye, la presión aumenta.

Este principio se puede escribir matemáticamente como:

$$p + \left(\frac{1}{2}\right)\rho V^2 = \text{constante} \quad [4] \quad (1)$$

donde:

p: Presión

ρ : Densidad del aire

V: Velocidad

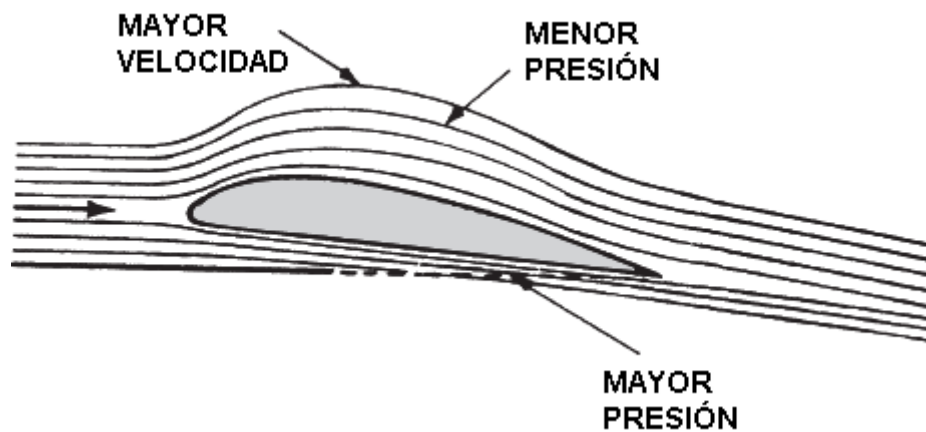


Figura 1. Diferencial de presión creado por un ala en vuelo [4]

2.1.1 Coeficiente de arrastre y elevación

Un fluido que tiene un vector de velocidad uniforme \vec{V}_{∞} sobre un objeto ejercerá una fuerza sobre el objeto \vec{F} . Esta fuerza puede descomponerse en dos componentes: un componente F_D paralelo a \vec{V}_{∞} , llamado arrastre, y un componente F_L normal a \vec{V}_{∞} , llamado elevación. En la figura 2 se puede observar la descomposición vectorial de la fuerza.

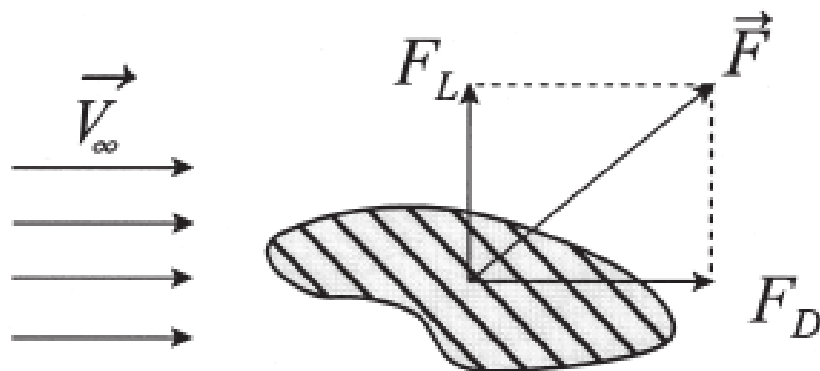


Figura 2. Fuerza de arrastre y elevación. Fuerza de arrastre y elevación [5]

La normalización de estas fuerzas en forma adimensional da como resultado:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (3)$$

donde:

C_D : Coeficiente de arrastre

C_L : Coeficiente de sustentación

F_D : Fuerza de arrastre

F_L : Fuerza de elevación

A : Área transversal

2.1.2 Capa límite

La capa límite es esa capa de aire adyacente a la superficie donde los efectos viscosos son muy importantes y fuera de la cual el fluido se comporta esencialmente como si fuese no viscoso por tal motivo la velocidad del aire en la capa límite varía desde cero en la superficie del perfil hasta la velocidad de la corriente libre en el borde exterior de la capa límite como se observa en la figura 3.

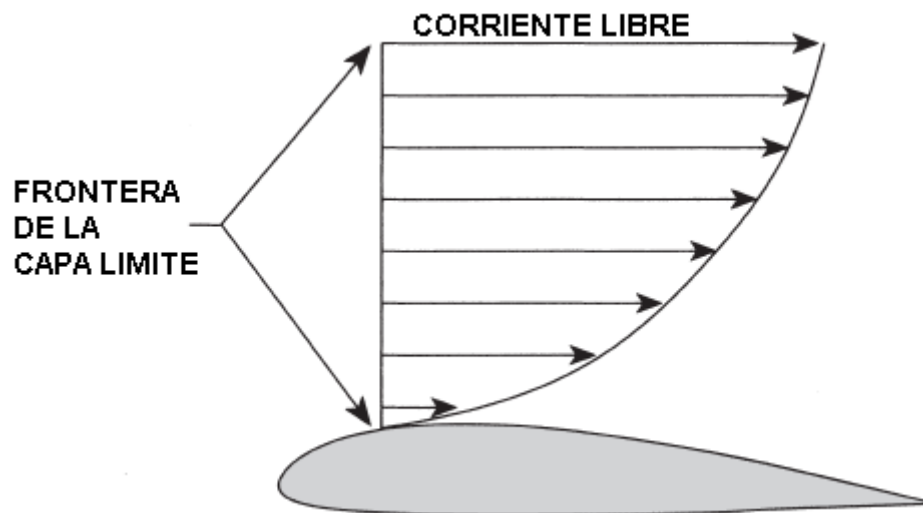


Figura 3. Vectores de velocidad del aire en aumento en la capa límite [4]

Técnicamente la viscosidad es la resistencia que ofrece un fluido al movimiento relativo de las partículas. La viscosidad en los gases es inusual ya que la viscosidad es función de la temperatura; una disminución de la temperatura aumenta la viscosidad.

Uno de los grandes avances en la mecánica de fluidos ocurrió en 1904 como resultado de la comprensión de Ludwig Prandtl (1875–1953), físico y aerodinámico alemán [6]. Él concibió la idea de la capa límite como una región delgada en la superficie de un cuerpo en la que los efectos viscosos son muy importantes y fuera de los cuales el fluido se comporta esencialmente como si fuera invisible. Claramente la viscosidad real del fluido es la misma en todas partes; solo la importancia relativa de los efectos viscosos (debido a los gradientes de velocidad) es diferente dentro o fuera de la capa límite, en la figura 4 se observa los efectos viscosos en la capa límite y la variación de la velocidad debido a esta.

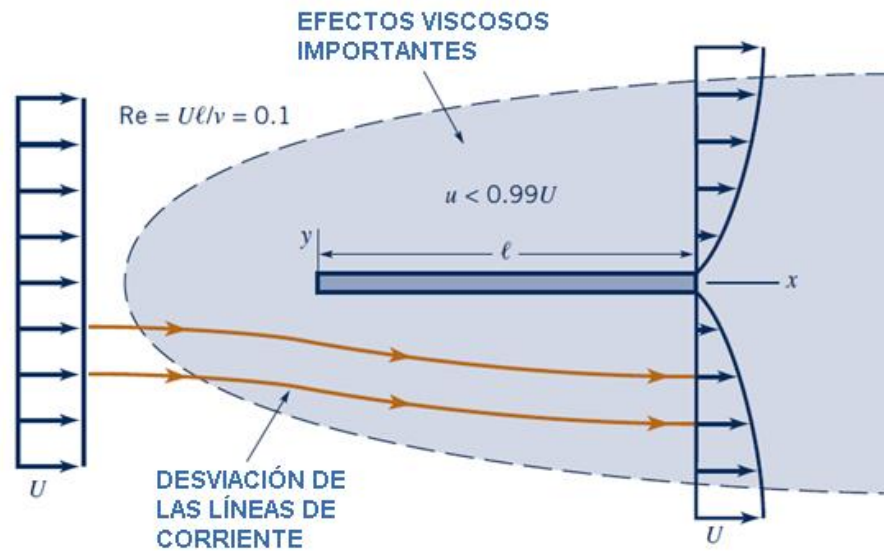


Figura 4. Características del flujo viscoso estable que pasa por una placa lisa [4]

Normalmente, el flujo del fluido en el borde delantero del cuerpo será laminar, pero a medida que el aire se mueve hacia el borde posterior, la capa límite se vuelve más gruesa debido al aumento de las fuerzas viscosas disminuyendo el flujo laminar. El área donde el flujo cambia de laminar a turbulento se llama región de transición, en la figura 5 se puede observar las características antes descritas.

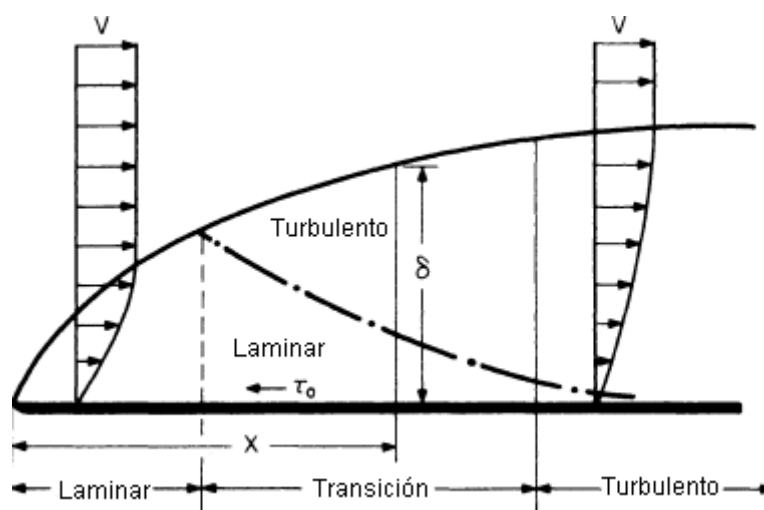


Figura 5. Características del flujo en la capa límite [7]

2.1.3 Numero de Reynolds

Osborne Reynolds (1842-1912), ingeniero y físico británico, estudió el flujo de líquidos en las tuberías y descubrió que a baja velocidad el flujo es suave, pero a alta velocidad es turbulento. Al experimentar con tuberías de varios tamaños y con diferentes líquidos, encontró un valor que llamó número crítico de Reynolds (R_e). El flujo fue laminar (suave) para valores por debajo del R_e crítico y turbulento para los valores por encima del R_e crítico.

El número de Reynolds esta dado por [4] :

$$R_e = \frac{V d}{\nu} \quad (5)$$

donde:

V : Velocidad del fluido

d : Distancia aguas abajo del borde de ataque

ν : Viscosidad cinemática del fluido

Los valores críticos de Reynolds en la capa limite son [8]:

Flujo laminar: $Re \leq 2000$

Flujo transicional: $2000 \leq Re < 7000$

Flujo turbulento: $7000 \leq Re$

2.1.4 Centro de presión

El centro de presiones es el punto alrededor del cual el momento aerodinámico generado es nulo, de modo que se puede suponer que las fuerzas presentes se aplican en dicho punto, se observa en la figura 6 un modelo esquemático del centro de presiones.

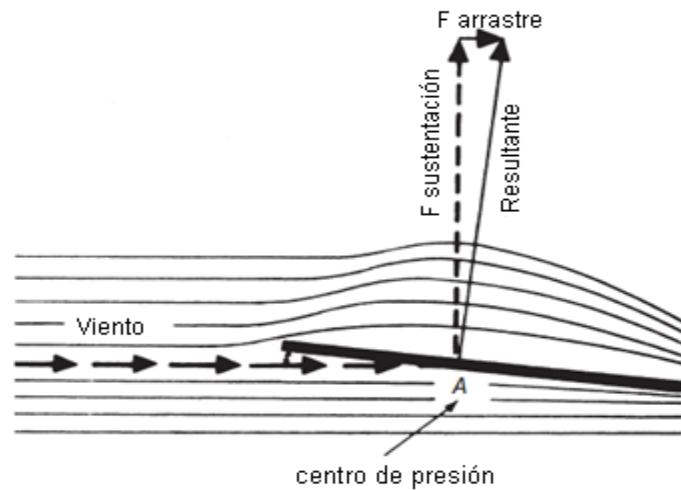


Figura 6. Centro de presión [4]

2.1.5 Numero de Mach

Permite expresar la velocidad de un objeto respecto a la velocidad del sonido.

Se define como:

$$M = \frac{V}{C} \quad (4)$$

donde:

V: Velocidad del fluido.

C: Velocidad del sonido en el medio en el que se desplaza

2.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha desarrollado a lo largo de los años como una disciplina independiente de las ciencias computacionales. La génesis del CFD se remonta a principios del siglo XX. CFD comenzó a evolucionar más rápidamente con el aumento de la potencia de cálculo en la década de 1980. Desde entonces, el poder computacional sigue aumentando año tras año y los algoritmos numéricos están mejorando. La introducción de la computación paralela y los grupos de computadoras a fines de la década de 1990 puso a disposición capacidades computacionales más y más económicas no solo para grandes

establecimientos de investigación sino también para industrias y universidades. Como resultado, CFD se convirtió en una herramienta fácilmente disponible para el diseño y la investigación de nuevos conceptos en dinámica de fluidos, en la figura 7 se puede observar el avance computacional a través del tiempo [7].

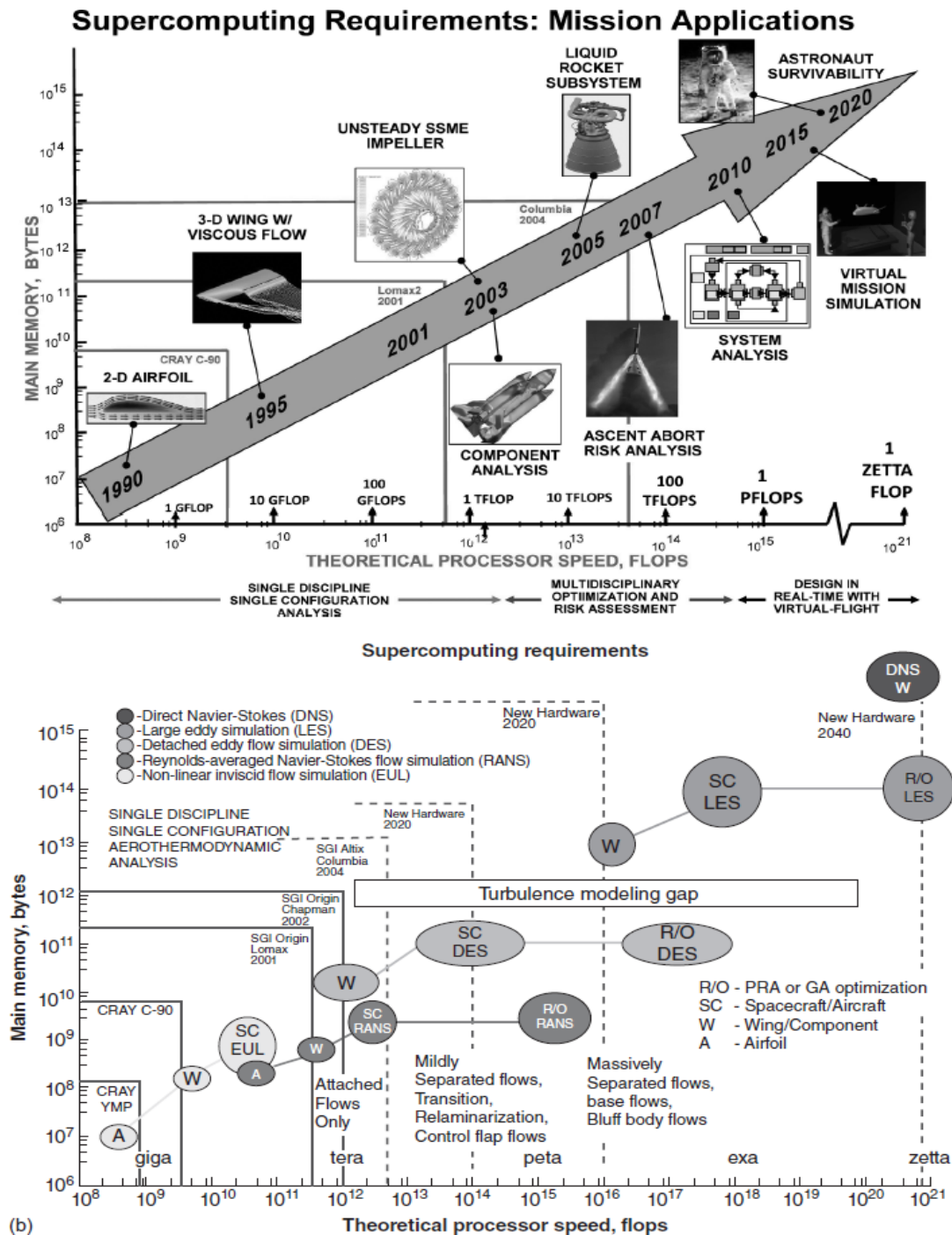


Figura 7. (a) Aumento de la potencia informática en los primeros años; (b) Capacidades actuales y proyectadas [7]

2.2.1 Ecuaciones fundamentales

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento fluido son los tres principios fundamentales de la masa, el momento y la conservación de la energía [5].

$$\text{Continuidad} \quad \frac{(\partial \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (5)$$

$$\text{Impulso} \quad \rho \frac{\partial V}{\partial t} = \nabla \cdot \tau_{ij} - \nabla \cdot p + \rho F \quad (6)$$

$$\text{Energía} \quad \rho \frac{\partial e}{\partial t} + p (\nabla \cdot V) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot q + \phi \quad (7)$$

donde:

ρ : Densidad del fluido

V : Vector de velocidad

τ_{ij} : Tensor de estrés viscoso

p : Presión

F : Fuerzas del cuerpo

e : Energía interna,

Q : Término de la fuente de calor

t : Tiempo

Φ : Término de disipación

$\nabla \cdot q$: Pérdida de calor por conducción

2.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes (NS)

Navier (Louis Marie henri,1785-1836) y Stoke (George gabriel,1819-1903) relacionaron el campo de esfuerzos con la deformación del campo resultante del campo de velocidad variable en el espacio y el tiempo. Aquí se invoca la ley de viscosidad de Stokes, una generalización de la ley de viscosidad de newton [9].

$$\text{Ecuación de continuidad} \quad \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (9)$$

$$\text{Ecuación de momento} \quad \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (10)$$

donde:

ρ : Densidad del fluido

$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$: Cambio de velocidad respecto al tiempo

$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$: Velocidad y dirección en que se mueve el fluido

∇p : Gradiente de presión interna del fluido

$\rho \vec{g}$: Fuerzas externas que actúan sobre el fluido (como la gravedad)

$\mu \nabla^2 \vec{V}$: Fuerzas de estrés interno que actúan sobre el fluido (teniendo en cuenta el efecto viscoso)

Existe una gran cantidad de software CFD comercial y de libre acceso para la solución numérica de las ecuaciones NS comprimibles. La mayoría del software CFD disponible se basa en el enfoque de discretización de volumen finito. Por varias razones, los métodos de volumen

finito (FV) ganaron popularidad sobre los métodos de diferencia finita (FD) o de elementos finitos (FE). El método de volumen finito se aplica a la forma de volumen de control de las ecuaciones de gobierno y es por construcción conservadora tanto a nivel celular como global. Esta propiedad es importante para la captura de impactos y se desarrollaron muchos esquemas de captura de impactos para la discretización de volumen finito. El FV es muy adecuado para mallas no estructuradas.

2.2.3 Modelos de turbulencia

El objetivo de las soluciones numéricas de CFD es simular con precisión flujos complejos sobre configuraciones completas de helicópteros o aeronaves para números realistas de Reynolds del orden de 10 millones. las soluciones CFD requeridas para el diseño y la prueba de nuevos conceptos tienen que basarse en las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) promediadas por Reynolds y utilizar modelos de turbulencia desarrollados a lo largo de los años a partir de modelos algebraicos simples, a modelos de turbulencia de una y dos ecuaciones incluso a siete ecuaciones Reynolds-estrés modelos de turbulencia. La mayoría de los códigos CFD de diferencia finita, volumen o elementos finitos utilizan un modelo de turbulencia de una ecuación o un modelo de turbulencia de dos ecuaciones como el modelo de turbulencia $k - \omega$, en la tabla 1 se observa los diferentes modelos turbulencia con sus ventajas y desventajas [10].

Tabla 1. Descripción de diversos modelos de turbulencia [3]

modelo	fortaleza	debilidades	comportamientos
Spalart - Allmaras	Económico (1 eq); Buen historial en flujos con capa límite levemente compleja	No muy ampliamente probado aún. Falta de submodelos (e.g. Combustión, empuje)	Económico para grandes mallas. Funciona mal para flujos 3D, flujos de corte libre, flujos con separación fuerte. Adecuado para flujos externos / internos levemente complejos y flujos de capa límite bajo un gradiente de presión (por ejemplo, flujos de aire, alas, aviones, fuselajes, misiles, cascos de barcos)
STD k-e	Robusto, económico, razonablemente preciso. Gran acumulado de datos de rendimiento.	Resultados mediocres para flujos complejos con severos gradientes de presión, fuerte curvatura aerodinámica y remolinos. Predice que los remolinos se propagan un 15% más rápido que los flujos planos, mientras que en realidad se propagan	Robusto. Ampliamente usado a pesar de conocidas las limitaciones del modelo. Funciona mal para flujos complejos que implican gradientes de presión altos, separación de flujo y fuerte curvatura aerodinámica. Adecuado para iteraciones iniciales.
RNG k-e	Bueno para un comportamiento moderadamente complejo del flujo como impacto de chorro, flujos de separación, remolinos y flujos secundarios.	Sometido a limitaciones debido a la suposición isotrópica de la viscosidad del remolino. Mismo problema con los remolinos en estándar k-e.	Ofrece en gran medida los mismos beneficios y tiene aplicaciones similares al Realizable. Es posible que sea más difícil de converger que el Realizable.
Realizable k-e	Ofrece en gran medida los mismos beneficios que el RNG, pero también resuelve la anomalía de los remolinos.	Sometido a limitaciones debido a la suposición isotrópica de la viscosidad del remolino	Ofrece en gran medida los mismos beneficios y tiene aplicaciones similares al Realizable. Es posible que sea más difícil de converger que el Realizable.
Reynolds stress	El modelo físicamente más completo (La historia, transporte y la anisotropía de los esfuerzos turbulentos son parámetros tenidos en cuenta)	Requiere más esfuerzo de CPU (2-3x); Ecuaciones de momento y turbulencia fuertemente acopladas.	Físicamente el modelo RANS más escuchado. Evita la suposición de viscosidad isotrópica del remolino. Se requiere más memoria y tiempo de cómputo. Adecuado para flujos complejos en 3D con fuerte curvatura en las líneas de flujo, fuertes remolinos (ej. conductos curvados, pasajes de flujo giratorio, cámaras de combustión con remolinos de entrada muy grandes, ciclones).
Standard k-w			Rendimiento superior para pared - capa límite, cortantes libres y flujos de bajo número de Reynolds. Apto para flujos complejos de capa límite bajo gradientes de presión adversos y separación de flujo. (Aerodinámica externa y turbomáquinas). Puede ser usado para flujos en transición.
SST k-w			Ofrece beneficios similares al standard k-w. La dependencia de la distancia a la pared lo hace menos adecuado para flujos cortantes libres.

2.3 Flujo de trabajo

En la figura 8, se propone un flujo de trabajo para el análisis aerodinámico del cuerpo de Ahmed

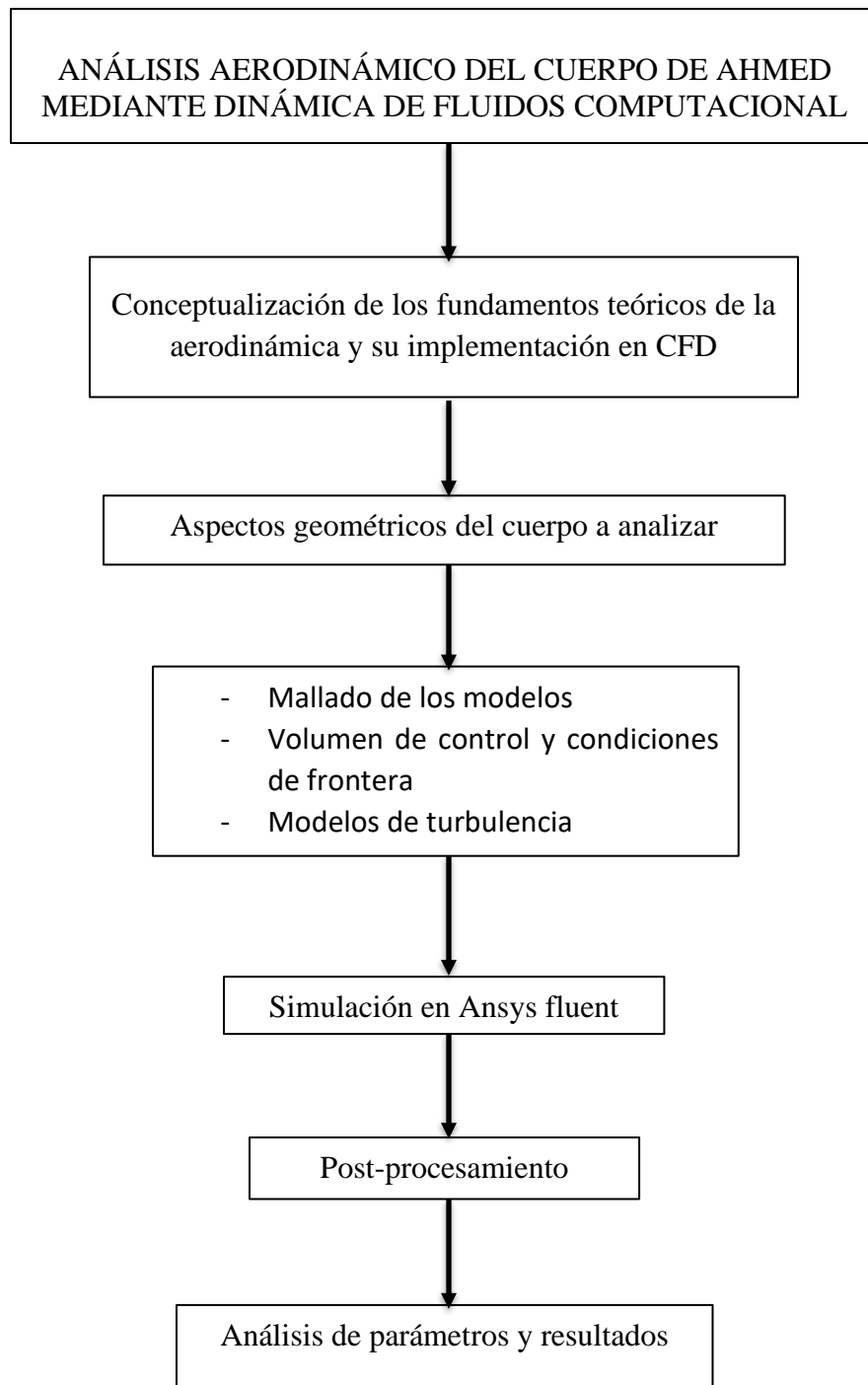


Figura 8. Flujo de trabajo

CAPÍTULO 3

Dominio computacional y condiciones de frontera

Con el propósito de optimizar el trabajo experimental y disminuir los costos de diseño, los expertos en aerodinámica de vehículos buscan permanentemente respuestas a los objetivos planteados por el cada vez más exigente mercado de consumidores. En tal sentido, las propiedades aerodinámicas son significativas para el rendimiento, conducción, seguridad y confort de los automóviles actuales. Por ejemplo, un bajo valor del coeficiente de arrastre favorece una mayor economía de combustible y disminuye las emisiones de gases, lo que incide en el cuidado del medio ambiente.

Por otra parte, el estudio de los modelos reales (para ensayos en ruta) o a escala (ensayos en túneles de viento) resultan costosos. Por estos motivos, entre otros, S.R. Ahmed y G.Ramm [2], analizaron un modelo simplificado, con una configuración geométrica simple, libre de aditamentos o accesorios, con superficies suaves, con el objetivo de generar las características esenciales de un campo de flujo de vehículos reales.

Los automóviles pueden ser definidos como “bluff bodies” (cuerpos obtusos) que se desplazan a velocidades relativamente moderadas y próximos al piso de la carretera. Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los mismos son el resultado de complicadas interacciones entre las separaciones de las capas de corte y las estructuras coherentes que se desarrollan en la zona posterior (estela) del flujo. Por consiguiente, los puntos claves para tener en cuenta y a observar son: las regiones donde se producen las separaciones, los puntos críticos, los núcleos y los vórtices.

3.1 Descripción geométrica del modelo

En los diferentes ensayos experimentales y simulaciones numéricas sobre el modelo de auto genérico definido por Ahmed, se analizan los comportamientos para diferentes valores del ángulo de inclinación del extremo trasero.

Para una longitud total L del modelo de 1044 [mm], la relación longitud: ancho: alto es de 3,625: 1,35: 1 [2].

El modelo está conformado por tres secciones: un cuerpo delantero, una sección media y una parte trasera, los bordes del cuerpo delantero están redondeados (arcos de elipse), con el objetivo de lograr un flujo libre de separaciones sobre la superficie; la sección media, con forma de caja, de aristas agudas con una sección transversal rectangular y el sector posterior o trasero, integrado por un conjunto de superficies inclinadas intercambiables, cuyo ángulo de inclinación, medido con respecto a la dirección del flujo, varía en un rango de 0° hasta 45° . La superficie inclinada tiene una longitud invariante de 222 [mm].

El sector posterior, del modelo original, es una simplificación del previamente definido en la conferencia Volkswagen Golf [1]. Nuestra simulación se enfoca básicamente en tres de ellos: 5° , $12,5^\circ$ y 30° , teniendo en cuenta que el flujo cambia de comportamiento para dichas configuraciones.

La figura 9 describe la geometría del modelo de Ahmed. Se especifican las dimensiones y los diferentes tipos de superficie inclinada, las que permiten estudiar su incidencia en la estela turbulenta y cómo contribuyen al valor de la fuerza de arrastre.

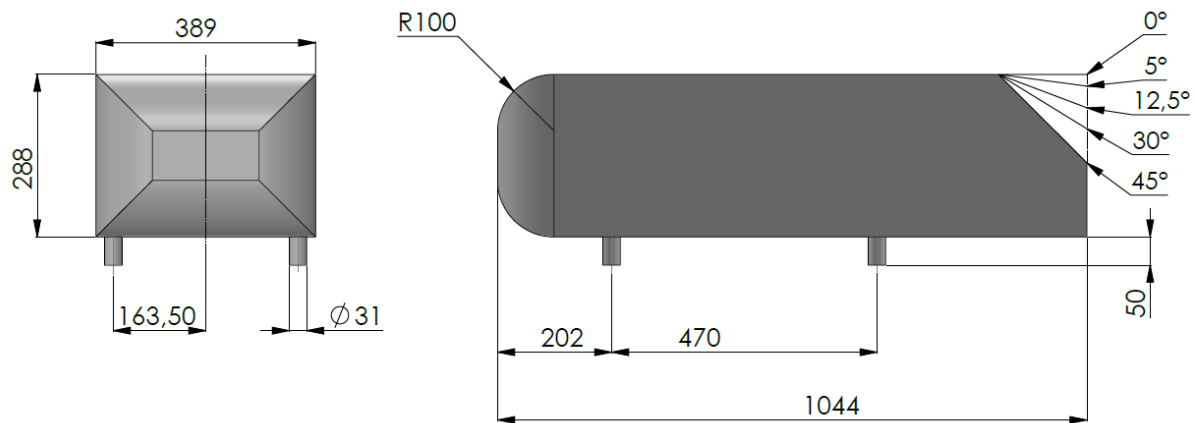


Figura 9. Modelo de Ahmed, dimensiones en [mm]

3.2 Dimensiones generales

Las dimensiones principales del dominio computacional tienen como referencia la longitud del cuerpo de $L=1,044$ m, Debido a los distintos ángulos de incidencia de viento simulados, las zonas de refinamiento de malla varían por la rotación del cuerpo de Ahmed. Además, con el objetivo de mantener la cantidad total de elementos para cada nivel de mallado se utilizan distintas formas y dimensiones en las zonas de refinamiento como se muestra en la figura 10 y 11, se tomó un volumen de control de tal forma que se puedan evidenciar las estelas de viento generadas por el vehículo, en la figura 12 se observa el volumen de control utilizado para la simulación aerodinámica.

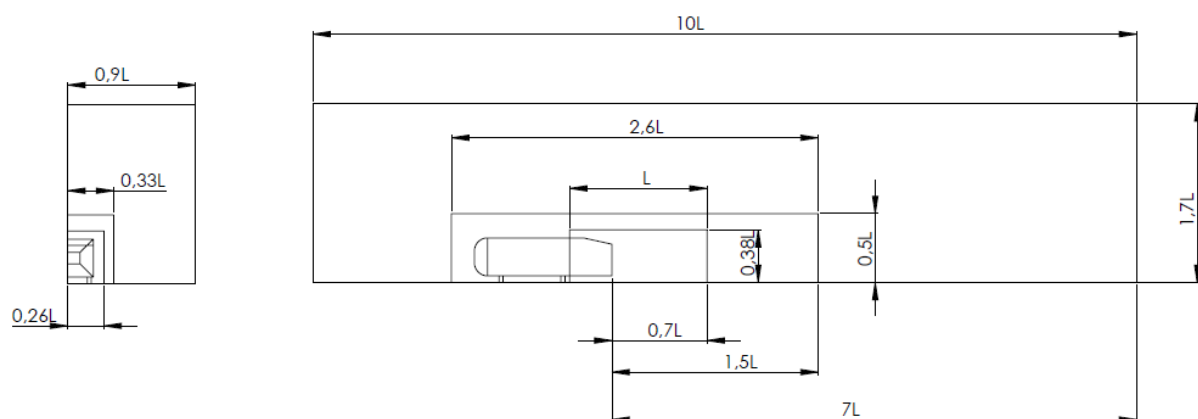


Figura 10. Dimensiones de los volúmenes de control en [mm]

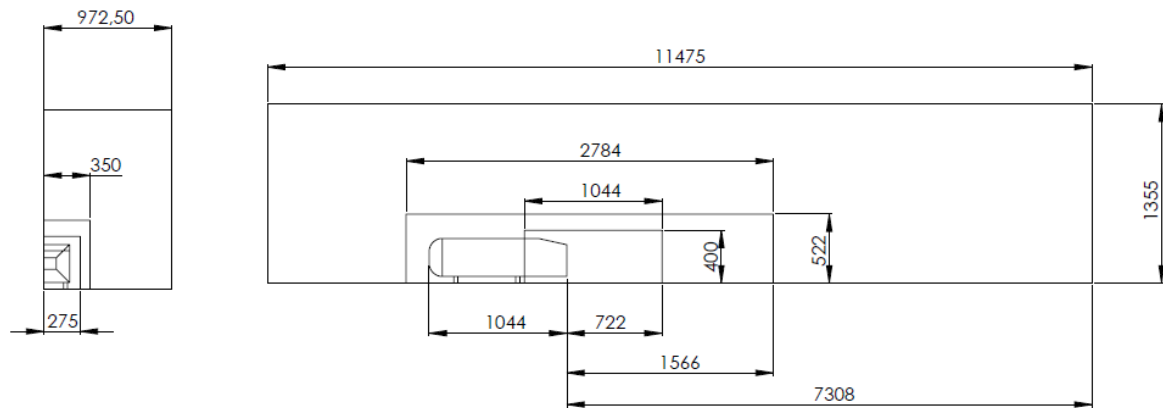


Figura 11. Dimensiones volúmenes de control, dimensiones en [mm]

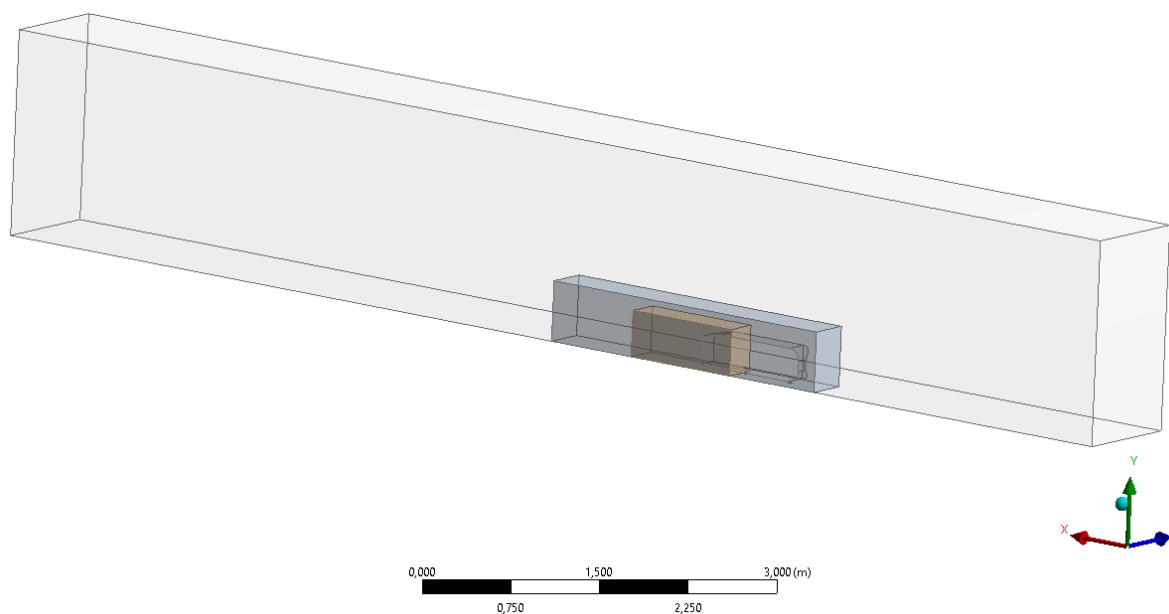


Figura 12. Volumen de control

3.3 Estrategias de mallado

En general, existen tres estrategias diferentes para crear la malla de volumen de control para la simulación [11]:

- Estrategia A (Adaptación)
- Estrategia B (Cuadros)
- Estrategia C (Controles)

3.3.1 Estrategia A (Adaptación)

Esta estrategia de simulación utiliza la funcionalidad de adaptación en el solucionador. Una malla relativamente gruesa se usa como punto de partida, y se calcula una primera solución. Para completar la simulación, son necesarias varias adaptaciones de gradiente de presión estática. En cada ciclo de adaptación, aproximadamente 1-3% del número total de las celdas se deben refinar usando el método de adaptación de nodos colgantes. Luego Se necesitan iteraciones hasta que se logre la convergencia de los coeficientes de arrastre y elevación. En general es necesario de 3 a 5 Los ciclos para alcanzar un estado donde los coeficientes de fuerza, o cualquier otro parámetro importante, ya no estará sujeto a ningún cambio significativo.

La estrategia A es el enfoque de mallado más rápido, pero no es óptimo debido a varios hechos:

1. Dado que el solucionador no tiene acceso a la base de datos de geometría original de la cuadrícula, la adaptación de la malla no es útil para mejorar la resolución de la geometría de la malla de la superficie.
2. Mediante el uso de la funcionalidad de adaptación de nodos colgantes, la inestabilidad numérica y quizás la difusión numérica se introducen por gradientes de gran tamaño de celdas vecinas.
3. La adaptación necesita varias intervenciones manuales por parte del usuario.

3.3.2 Estrategia B (Cajas)

Esta estrategia se basa en cajas internas creadas alrededor del vehículo y en la región de interés para controlar explícitamente el tamaño de la malla. Este enfoque requiere más tiempo que la estrategia A, pero es muy preciso. Las cajas generalmente se crean en la herramienta de preprocesamiento. Se aplica un tamaño constante de elementos de superficie a las paredes de

la caja. Los cuadros se usan como dominios de malla, en los que el tamaño de celda se puede controlar de una manera muy cómoda. Otra ventaja de este método es la posibilidad de combinar diferentes técnicas de mallado en un modelo. Por lo tanto, las mallas hexagonales se pueden usar para la región exterior del túnel de viento y se pueden guardar para diferentes simulaciones, mientras que solo se cambia la caja interna. La conexión entre esas cajas puede ser conforme usando pirámides o no conforme usando la definición de interfaz.

3.3.3 Estrategia C (Controles)

En esta estrategia, los cuadros internos se reemplazan por cuadros virtuales (cuadros de refinamiento local) utilizados para el refinamiento de celdas. Por lo tanto, se utiliza la funcionalidad de refinamiento local. Este enfoque puede usarse para mallas tetraédricas o hexagonales generales. Este enfoque es muy preciso y evita la creación de superficies adicionales en pasos anteriores. Esta estrategia es recomendada para flujos externos.

Para el análisis del cuerpo de Ahmed se utilizó la estrategia c (control) ya que es la que más se adapta a las necesidades de la simulación.

3.3.4 Elementos

La malla computacional es de vital importancia, ya que ésta divide el dominio computacional en volúmenes más simplificados y a través de ellos resolverán las ecuaciones diferenciales, además permitirá tener estabilidad y exactitud en los resultados. Para llevar a cabo la generación de la malla computacional, se requiere del uso de algunos métodos de mallado, los cuales constan de los siguientes elementos:

- Tetraedros
- Prismas
- Pirámides

3.3.4.1 Tetraedros

Cuando se genera una malla tetraédrica se aprovecha al máximo el uso de malla no estructurada, proporcionando una malla equilibrada sobre la superficie, además de contar con una transición de crecimiento de volumen controlada. El uso de elementos tetraédricos proporciona una buena calidad de malla y tiene consigo una ventaja, la cual es en generar de manera automatizada los elementos [12].

El uso de tetraedros fue fundamental para la malla computacional del vehículo por que permite adaptarse mejor a la geometría del cuerpo. Además de esto, permitió generar refinamientos con excelente calidad.

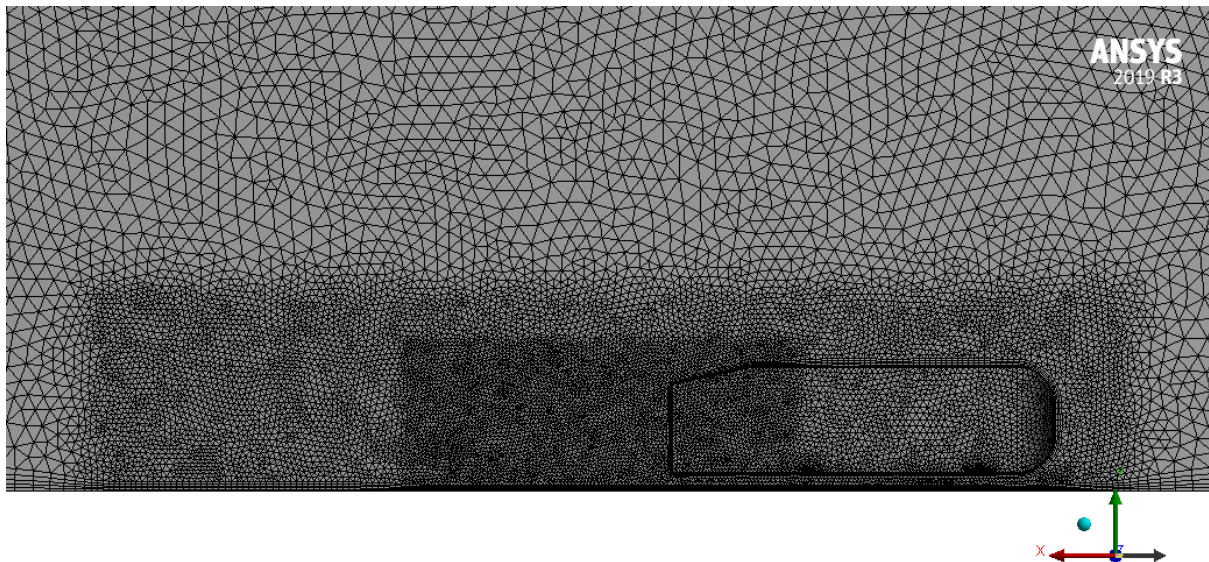


Figura 13. Uso de tetraedros en la malla computacional del vehículo

Definidos estos tamaños de los elementos se procedió a generar la malla computacional. En la figura 13 se puede apreciar el uso de los tetraedros y la malla generada con estas características. Con el fin de obtener una mayor precisión en el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo, se definieron zonas más finas con tamaños de elementos de 0,01 y 0,015 metros como se muestran en las figuras 14 y 15 respectivamente. Estos elementos permiten obtener mayor detalle las zonas de mayor importancia.

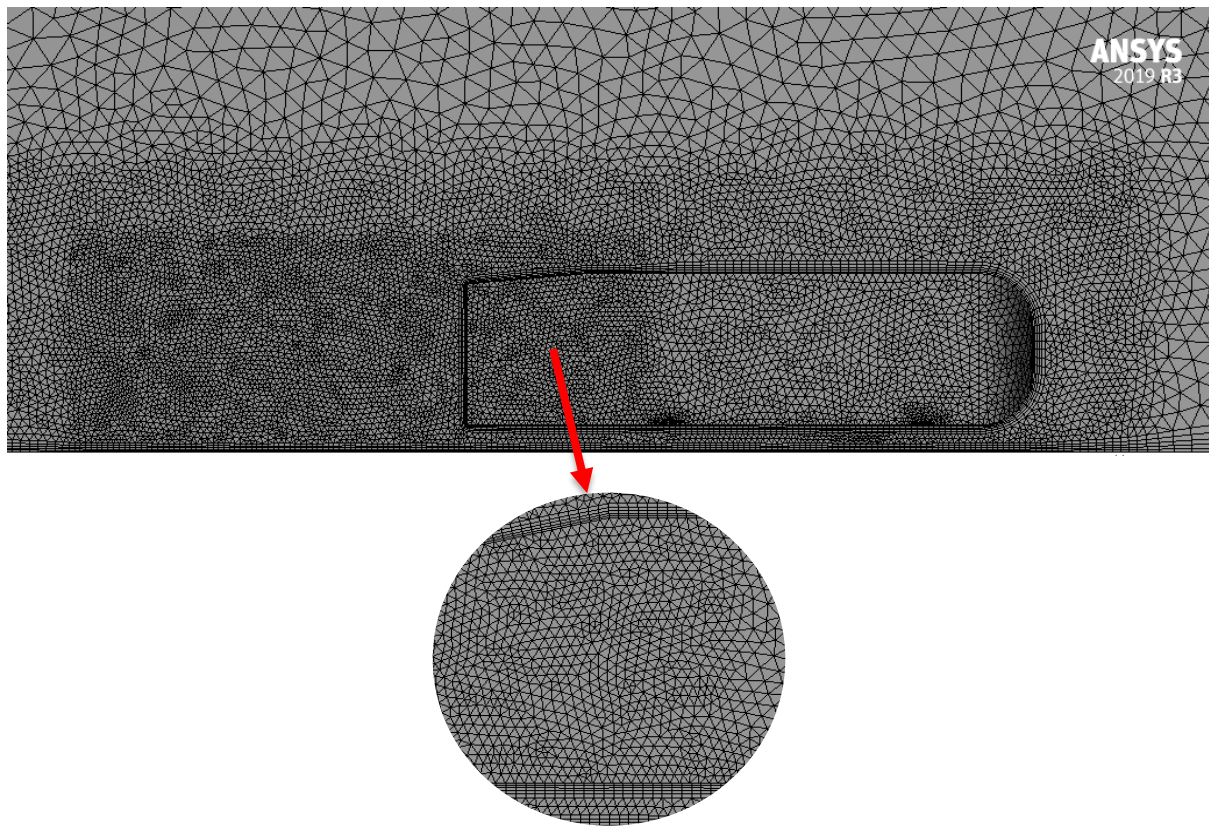


Figura 14. Zona de refinamiento de tamaño 10 mm

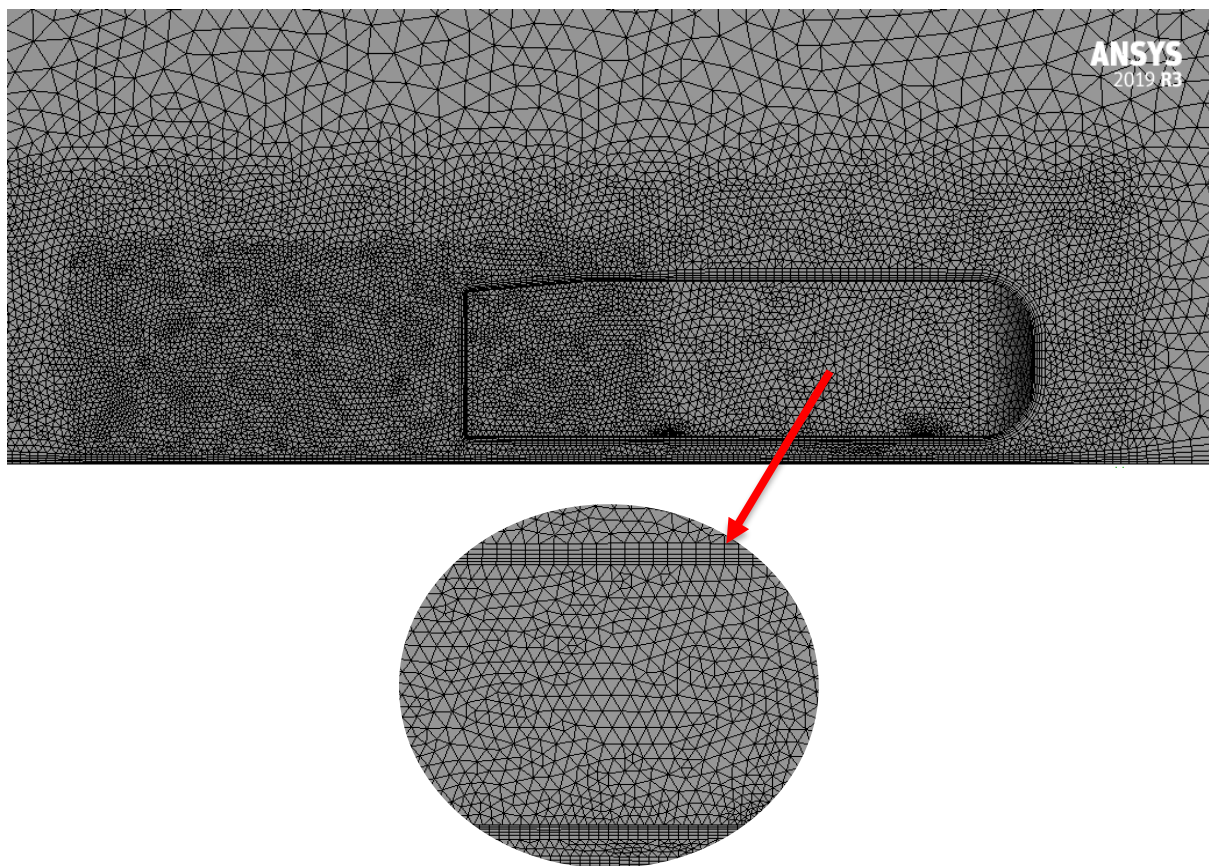


Figura 15. Zona de refinamiento de tamaño 15 mm

En la Tabla 2 se detallan la cantidad total de elementos y nodos. La diferencia en cantidad de elementos y nodos observada es debido a la variación del ángulo de inclinación de la parte trasera del vehículo.

Tabla 2. Cantidad de elementos y nodos

Ángulo	Elementos	Nodos
5°	2.291.215	481.585
12,5°	2.294.855	482.004
30°	2.306.771	484.184

3.3.4.2 Prismas

El uso de este consiste en capas de elementos cerca de la frontera, superficie y/o elementos tetraédricos en el interior, con el propósito de mejorar el análisis del campo de flujo cercano a las paredes. El uso de prismas permite obtener una mejor convergencia y mejores resultados [12].

Debido a que se trata de un análisis CFD orientado a la parte aerodinámica del cuerpo, se opta por hacer uso de los prismas, con el propósito de generar un mejor análisis, tomando en cuenta el desprendimiento de la capa límite, el cual es de vital importancia para estudios de fluidos externos sobre un vehículo, permitiendo a su vez tener una buena predicción tanto cualitativa como cuantitativa.

Teniendo en cuenta todo esto, para la generación de la malla computacional, se procede al uso de la opción “inflation” (inflación), definiendo los siguientes parámetros: “first aspect ratio” (primera relación de aspecto) como opción de inflación, cinco capas de prismas con una tasa de crecimiento de 20%.

En la figura 16 se pueden apreciar las cinco capas de prismas y en la figura 17 los prismas generados en la superficie del vehículo.

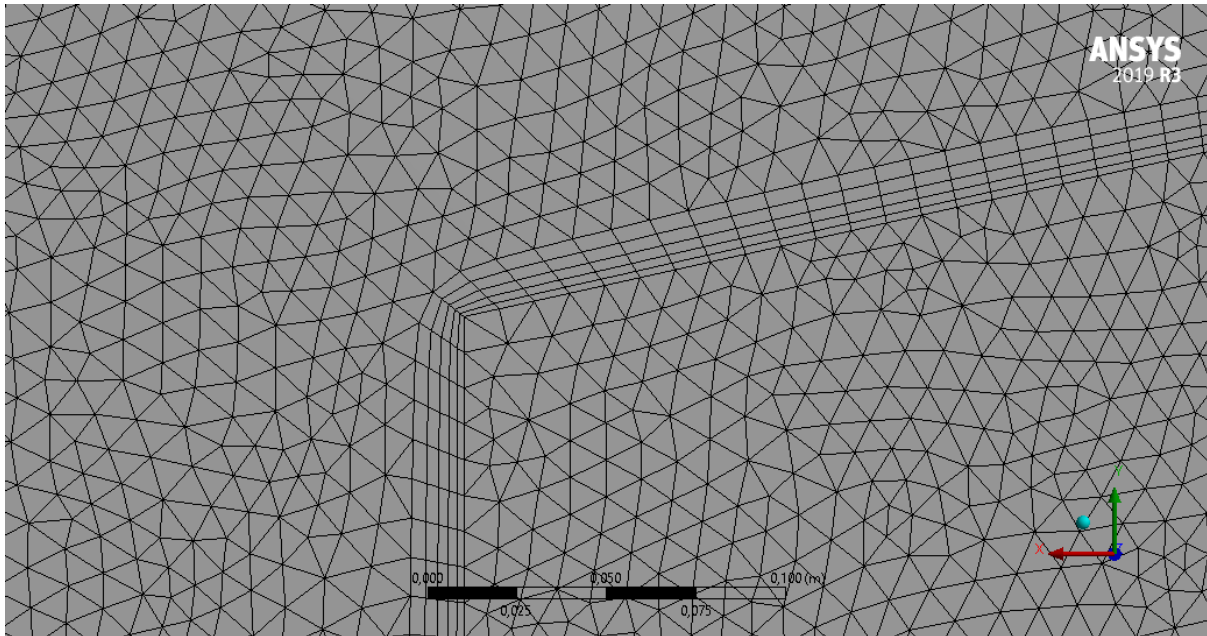


Figura 16. Detalle de prismas en las paredes del cuerpo

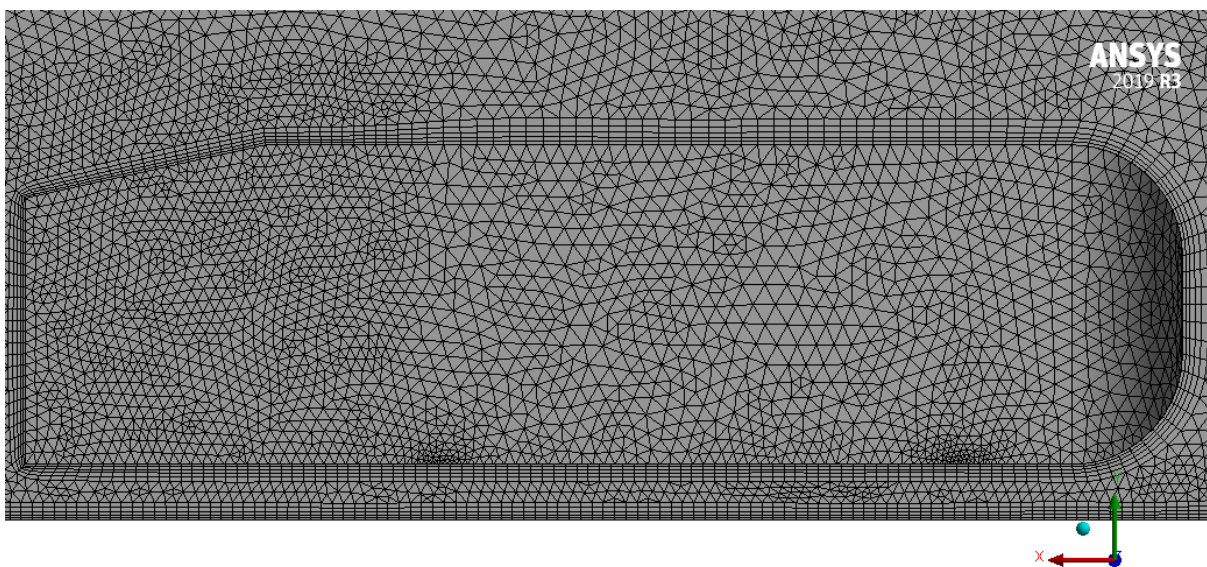


Figura 17. Generación de prismas en la malla computacional.

3.3.4.3 Pirámides

Un elemento piramidal tiene una cara de cuadrilátero en su base y cuatro caras triangulares que se extienden desde los lados de la base. Para la generación de una malla conformada con regiones de celdas tetraédricas adyacentes a una región hexaédrica o de prisma, en donde primero se genera una capa de pirámides como una transición de cuadriláteros. Después de

crear una sola capa de elementos piramidales, se utilizan las caras triangulares resultantes para crear tetraedros.

Debido a que la malla computacional del vehículo se encuentra compuesta de tetraedros y prismas, se generan una capa de elemento tetraédricos, los cuales permitirán que se interconectan, haciendo que de esta manera se genere una malla correctamente acoplada entre sus elementos. En la figura 18 se presenta la capa piramidal generada en la malla computacional del vehículo.

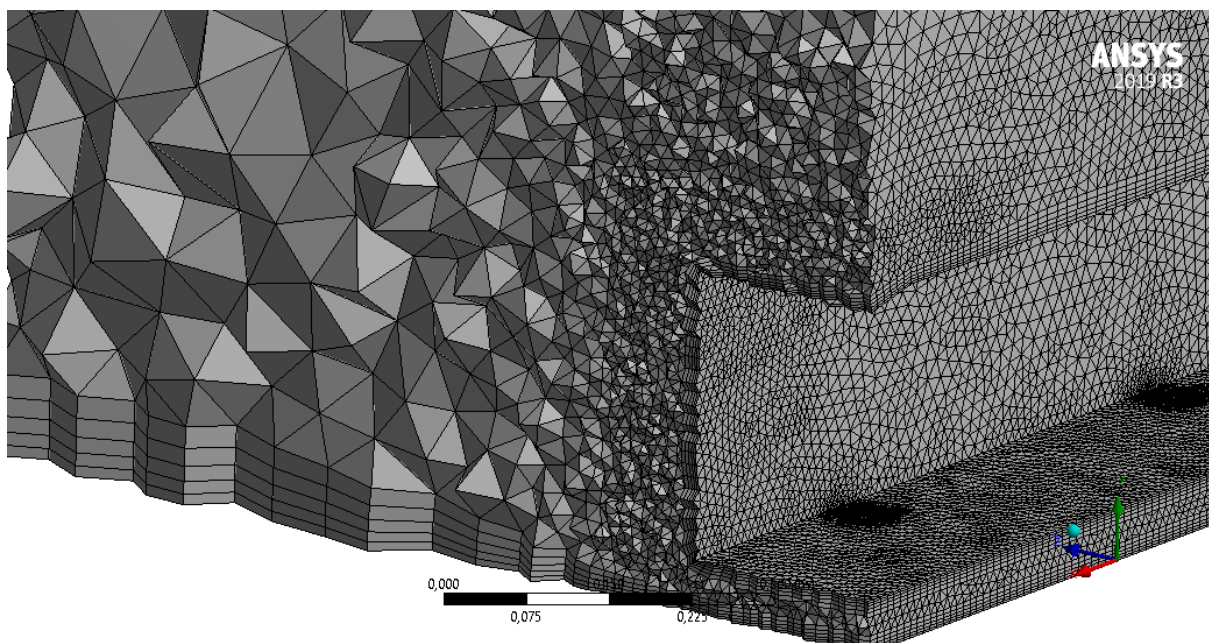


Figura 18. Capa piramidal de la malla computacional del vehículo

3.3.4.4 Malla híbrida

Los tetraedros y prismas pueden unirse a través del uso de una capa de elementos piramidal, la cual se crea automáticamente para hacer la conformación de los tipos de malla. Este tipo de mallas es de vital importancia para mallas no estructuradas, en especial cuando se desea hacer análisis a una geometría compleja. En la figura 19 se presenta la interconexión de tetraedro y prisma a través de un elemento piramidal, conformando una malla híbrida [12].

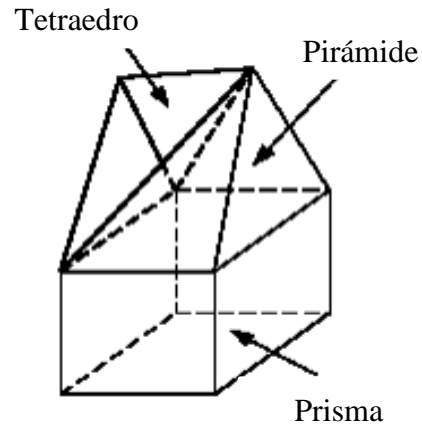


Figura 19. Conformación de una malla híbrida [12]

3.3.5 Parámetros

Para llevar a cabo la malla híbrida, se necesita utilizar una serie de parámetros, los cuales permitirán obtener una malla computacional con buena calidad y a su vez que sea totalmente idónea para el análisis a realizar. los parámetros utilizados fueron:

- “Size” (Tamaño)
- “Inflation” (Inflación)

3.3.5.1 “Size” (Tamaño)

El size se encarga de proporcionar un control sobre la distribución de los elementos en la malla, ya sea sobre una superficie o dentro del volumen de control. Adicional a esto, esta herramienta se encuentra asociada con el cuerpo o las diferentes zonas a enmallar. La distribución de la malla está influenciada por el tamaño máximo y mínimo de los elementos, tasa de crecimiento, y la fuente de tamaño [12].

Para un mayor refinamiento, se utilizó “size” en todo el cuerpo para así tener un mejor resultado en el enmallado, aunque para obtener el buen resultado, se modificaron algunas medidas de los volúmenes control.

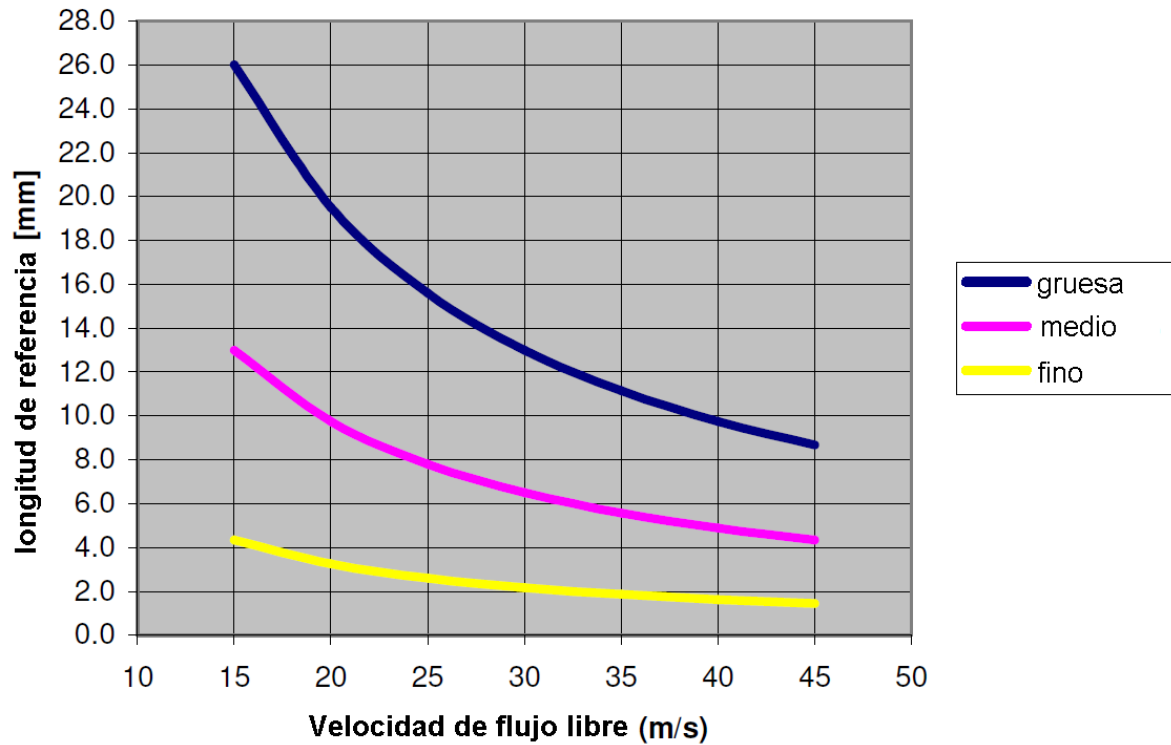


Figura 20. Estimación de la longitud de referencia de la malla de superficie [11]

De acuerdo con la figura 20 se puede elegir una triangulación de superficie gruesa que conducirá a una malla inicial de aproximada de 2 millones a 5 millones de elementos. Una resolución media, que actualmente forma parte del enfoque estándar, dará lugar a mallas que consisten en aproximada de 5 millones a 10 millones de elementos, mientras que una resolución fina corresponderá a la malla más allá de 10 millones de elementos. El número total de celdas depende en gran medida de la complejidad de la geometría y la configuración de la malla de volumen.

3.3.5.2 “Inflation” (Inflación)

Es utilizado para generar celdas delgadas adyacentes a las fronteras, el cual se lleva a cabo mediante la extrusión de caras normales a un límite. El uso de la inflación se requiere para la captura de las capas límite de pared adyacente para resolver capa límite viscosa en CFD. Para

la generación de inflación en tres dimensiones, las células son creadas por inflado de la malla de superficie en el volumen y adicional a esto la inflación posee una opción de crecimiento controlado [12]. En la figura 21 se presenta el uso de la inflación en una malla computacional.

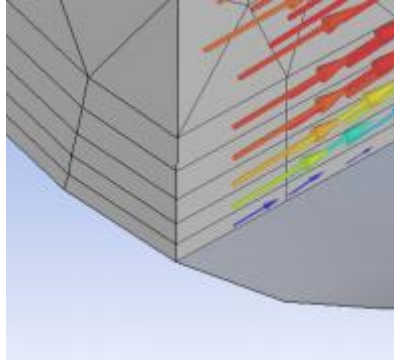


Figura 21. Malla computacional con inflación [12]

En la figura 22, se presenta la capa de primas sobre la superficie del vehículo, generados a través de la opción “first aspect ratio” (primera relación de aspecto).

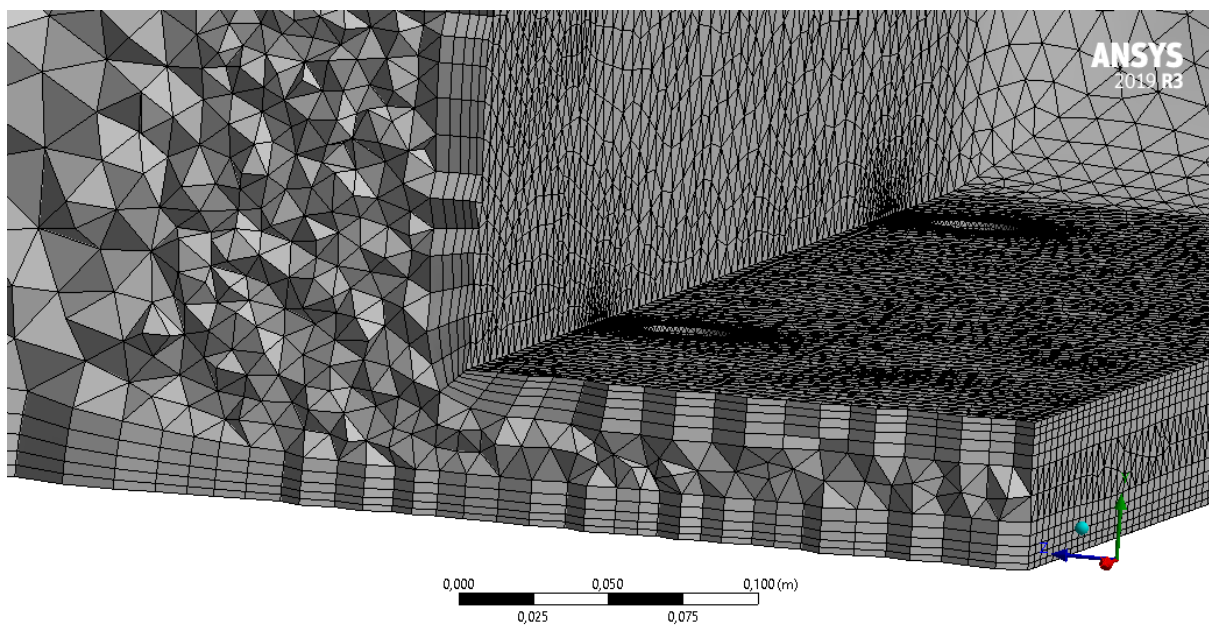








Figura 22. Malla computacional con mejor resolución de la inflación

3.4 Calidad de la malla


Para realizar un mallado de buena calidad se debe de tener en cuenta varias características, como la limpieza de la geometría como eliminar aristas vivas o bordes con radios muy pequeños.

La limpieza de malla es importante, pero hay otras características que ayudan a mejorar la generación de una buena calidad. En la tabla 3 se presenta una comparación de calidad de malla con respecto a sus elementos.


Tabla 3. Calidad de celdas en la malla computacional [13]

Características	Buena	Mala
Celda no muy distorsionada		
Celda no muy estirada		
Transición de celdas lisas		

Otros aspectos importantes para tener en cuenta es la calidad ortogonal la cuenta se muestra en la tabla 4 y la calidad del “skewness” (oblicuidad) mostrada en la tabla 5. Los valores que se presentan en las figuras son los datos estadísticos que pueden clasificar la calidad del dominio computacional, permitiendo ser bueno, aceptable o inaceptable; por medio de estas estadísticas se garantiza una calidad de malla computacional y también obtener predicciones sobre los resultados [13].

Tabla 4. Clasificación estadística de la calidad ortogonal [13]


Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Tabla 5. Clasificación estadística de la oblicuidad [13]


Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

3.4.1 Calidad ortogonalidad de la malla

Ya finalizada la malla computacional con sus diferentes refinamientos, se hace la verificación de la calidad observado los datos obtenidos por el software, para garantizar su calidad y también su exactitud en la predicción de los resultados.

Teniendo en cuenta todos estos apartados, se procede a obtener los resultados estadísticos de los 3 modelos de los vehículos en estudio, la cual muestra la buena calidad de la malla encada uno. en las figuras 23, 24 y 25 se presentan los diagramas de ortogonalidad.

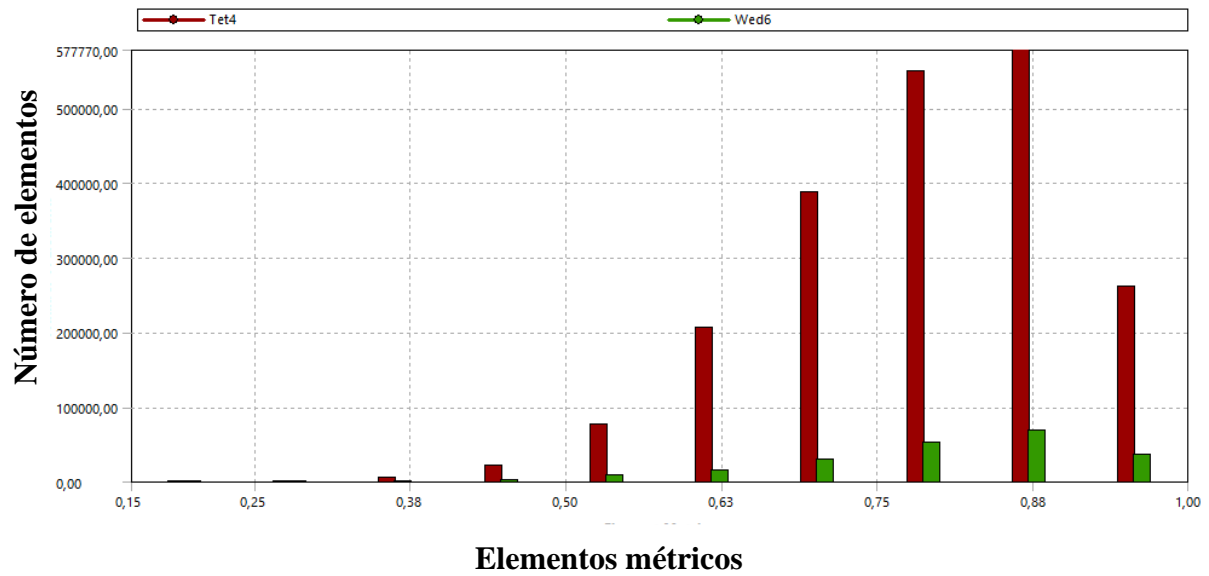


Figura 23. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 5°

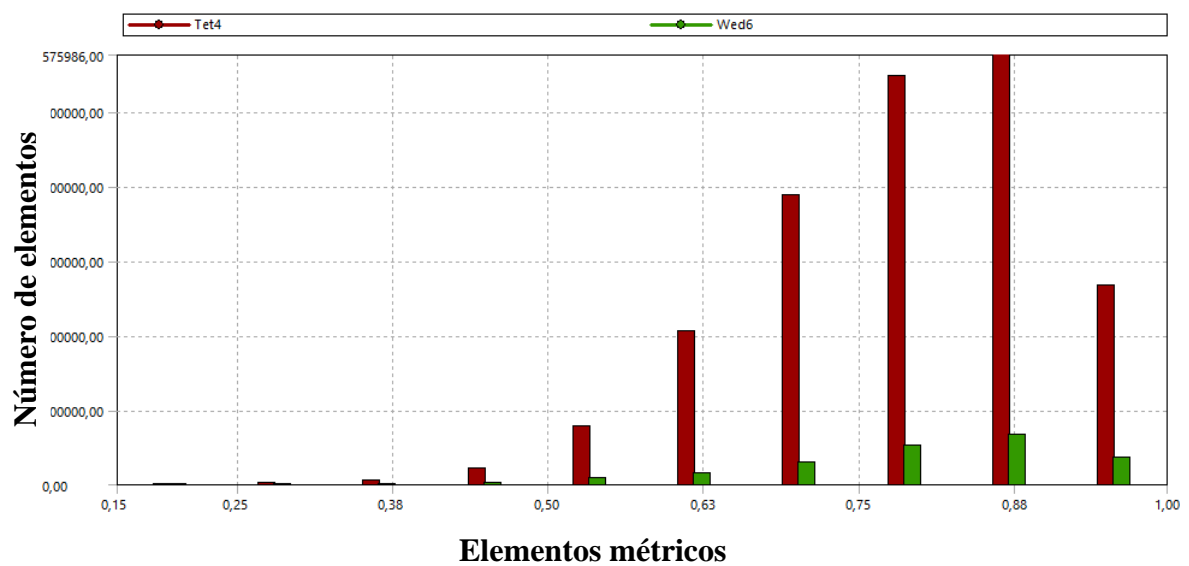


Figura 24. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 12,5°

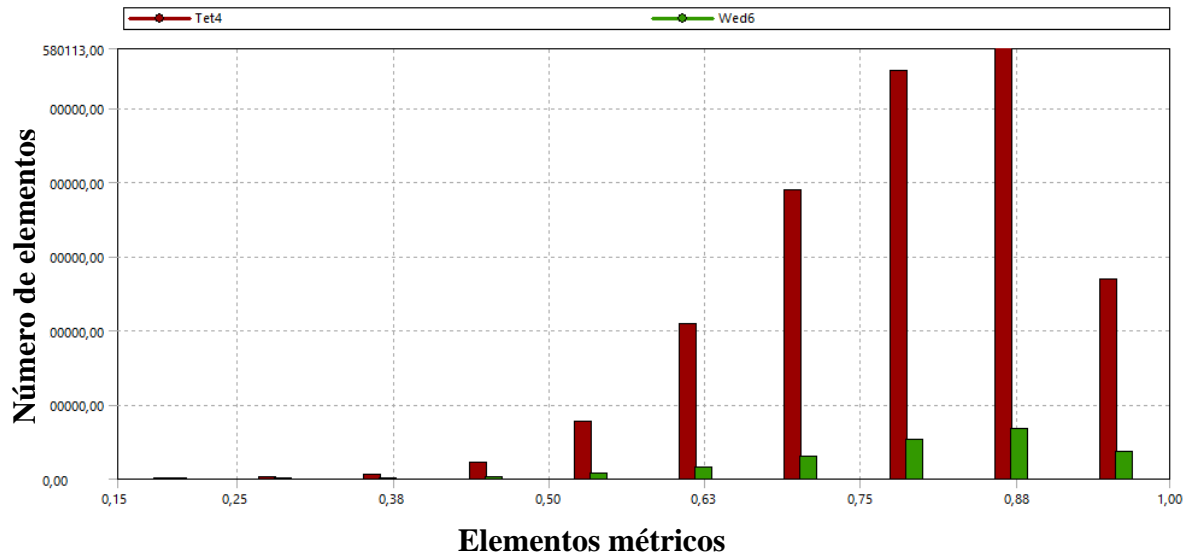


Figura 25. Clasificación estadística de la calidad ortogonal de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 30°

3.4.2 Calidad “skewness” (oblicuidad) de la malla

La oblicuidad es el indicador de malla más importante, porque indica que tan próximo está a una celdilla ideal (cada una de las celdas se entiende como celdilla ideal), aunque es rectangular equilátero. de acuerdo con la clasificación estadística de oblicuidad anteriormente descrita se puede observar que 0 indica excelente y 1 indica completamente inaceptable.

En las figuras 26, 27 y 28 se presentan los diagramas estadísticos obtenidos en cada una de las simulaciones de la oblicuidad de los elementos [14].

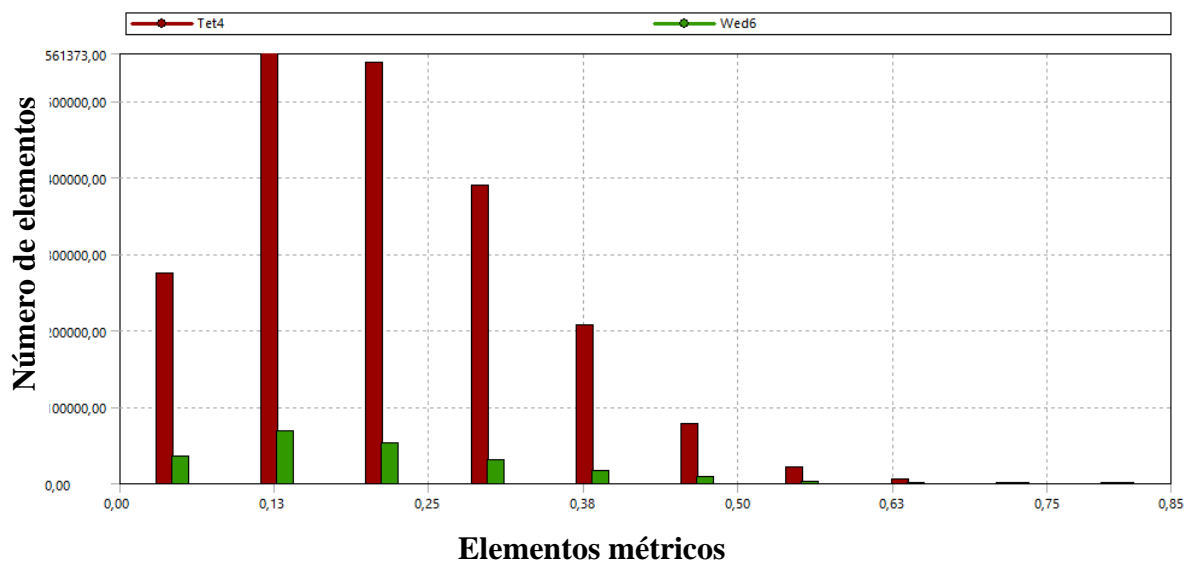


Figura 26. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 5°

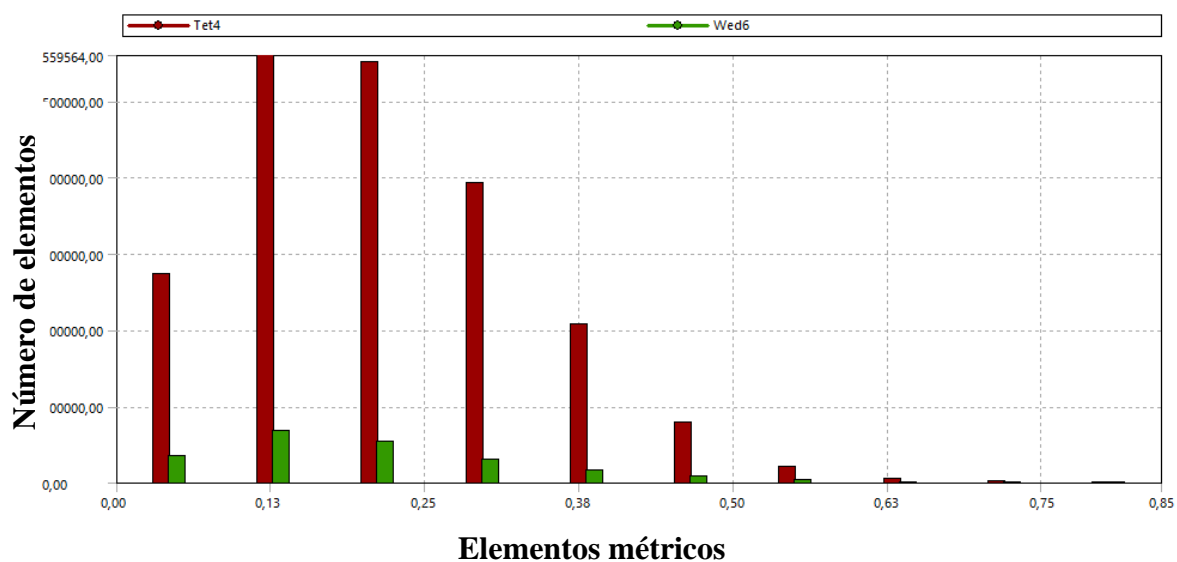


Figura 27. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 12,5°

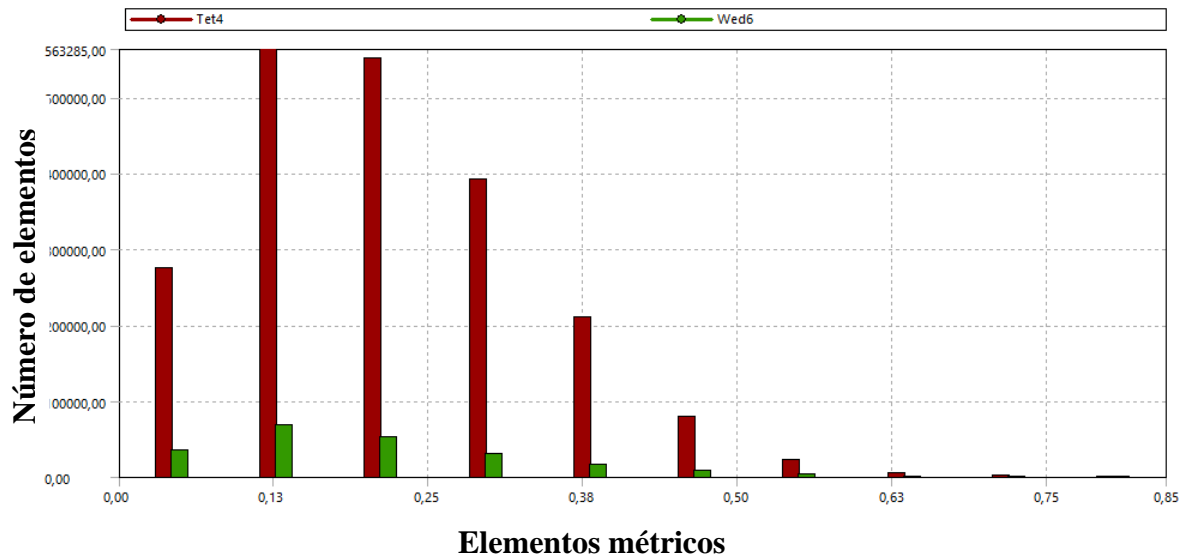


Figura 28. Clasificación estadística de la calidad oblicua de la malla computacional del vehículo con ángulo de inclinación de 30°

Como se puede observar los elementos de las mallas realizadas presentan ortogonalidad y oblicuidad aceptable para continuar con el estudio planteado, ambas poseen una calidad de malla buena por lo que realizando la simulación aerodinámica del vehículo se podrá obtener resultados confiables.

3.5 Condiciones de frontera

Para definir las condiciones de frontera, se debe tener claro la dirección del viento para ubicar en el dominio computacional su entrada y salida además del posicionamiento del vehículo. En la figura 29 se observa las condiciones de frontera aplicadas al modelo.

Unas condiciones de frontera pobremente definidas pueden tener un impacto significativo en la solución [15].

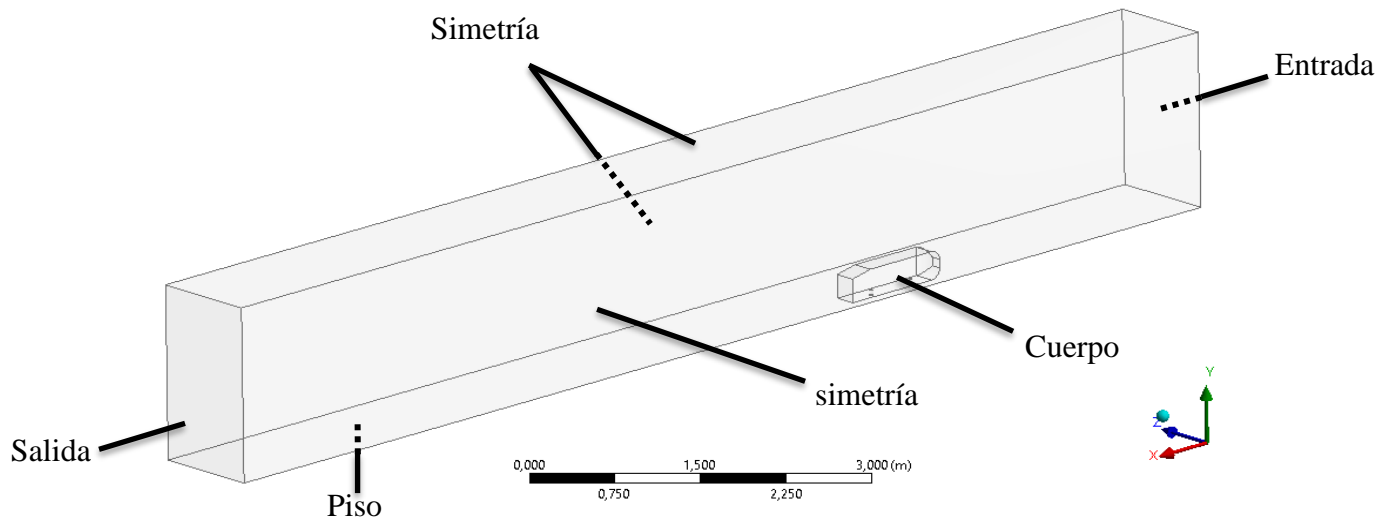


Figura 29. Condiciones de frontera

La superficie “Velocity Inlet” (Velocidad de entrada) corresponde a la entrada de aire del dominio, cuya condición de frontera permite establecer la velocidad y la dirección del fluido en la entrada del flujo, así como todas las propiedades escalares relevantes del flujo. Para este caso, la velocidad máxima del vehículo considerada es de 60 m/s [15].

La condición “Pressure outlet” (Presión de salida) define la presión manométrica que es aplicada en el vehículo, la cual nos permite conocer la presión en cualquier punto en el interior del vehículo, el valor designado para la simulación es de 1 atm.

La condición “wall” esta condición de frontera es utilizada para unir regiones fluidas y sólidas. esta función puede especificar un componente de velocidad tangencial en términos del movimiento de traslación o rotación del límite de la pared, o modelar una pared de "deslizamiento" especificando cizalla. (También puede modelar una pared de deslizamiento con cizalladura cero utilizando el tipo de límite de simetría, pero el uso de un límite de simetría aplicará condiciones de simetría para *todas las* ecuaciones [15].

Las condiciones de contorno de “symmetry” se usan cuando la geometría física de interés y el patrón esperado tienen simetría de espejo. También se pueden usar para modelar paredes de deslizamiento de corte cero en flujos viscosos. No definen ninguna condición de flujo, pero debe tener cuidado de definir correctamente sus ubicaciones.

Como se expresa en la introducción de la configuración física en ANSYS Fluent [16], no se deben observar grandes gradientes en la dirección normal a la frontera, ya que esto puede ser indicio de una configuración incorrecta o se debe mover la frontera más adelante o atrás, según corresponda, de donde se encuentran los gradientes. Adicionalmente, se debe tratar de minimizar el parámetro de oblicuidad en la malla cerca de la frontera, dado que los errores debidos a un alto oblicuidad pueden propagarse al resto del dominio computacional.

En términos generales en la tabla 6 podemos observar un resumen de las condiciones de frontera utilizados en el cuerpo de Ahmed como son la velocidad de entrada, presión de salida, suelo o superficie, paredes, top y vehículo.

Tabla 6. Resumen de las condiciones de frontera aplicadas en el modelo

Geometría	condición de frontera
Entrada	Velocity inlet $V = 60 \text{ m/s}$
Salida	Pressure outlet Gauge pressure = 0
Suelo o superficie	Wall. No slip
Paredes laterales	Symmetry
Top	Symmetry
Vehículo	Wall. no slip

CAPÍTULO 4

Resultados

Los estudios realizados con software de CFD se enfatizan en reproducir los fenómenos naturales y mecánicos lo más preciso posible pero siempre habrá una brecha de incertidumbre en los resultados y la realidad, por tal motivo se debe tener en cuenta la malla computacional elaborada y sus respectivas características.

Los resultados obtenidos en este trabajo se han comparado con los encontrados por Ahmed [2] en las pruebas físicas realizadas en túnel de viento, se puede apreciar las discrepancias en los datos calculados por CFD y las pruebas de laboratorio.

4.1 Convergencia numérica

En las figuras 30, 31 y 32 se aprecia la convergencia de cada ángulo de la parte trasera del vehículo, el cual en los tres casos se utilizaron diferentes números de iteraciones, ya que el comportamiento aerodinámico varía. Los resultados obtenidos para k nos muestran una línea decreciente mostrando un resultado aceptable para la simulación.

En la convergencia del coeficiente de arrastre (C_D), el comportamiento de la simulación no es estable, evidenciando que a medida que el ángulo de incidencia aumenta, se presenta mayor dificultad para converger como se denota en el ángulo de 30° ya que no se logró llegar a una estabilidad deseada a pesar de que se tomó un número mayor de iteraciones en comparación con los otros dos ángulos.

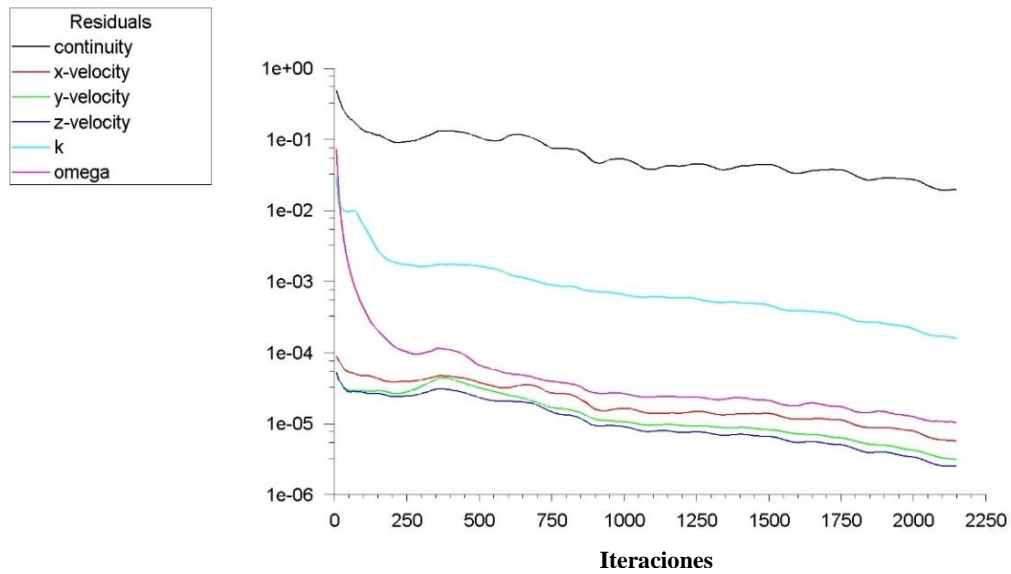


Figura 30. Convergencia del análisis aerodinámico ángulo 5°

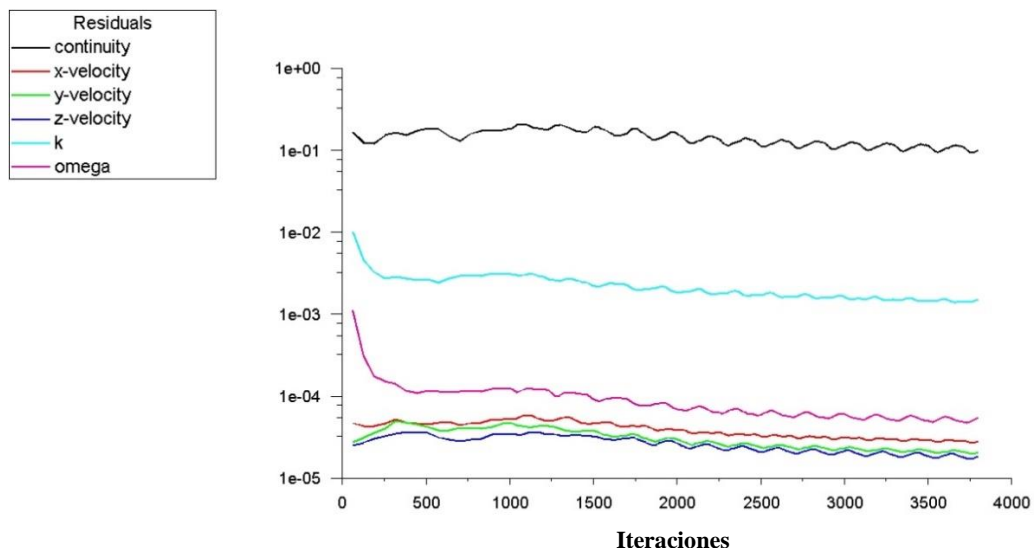


Figura 31. Convergencia del análisis aerodinámico ángulo 12,5°

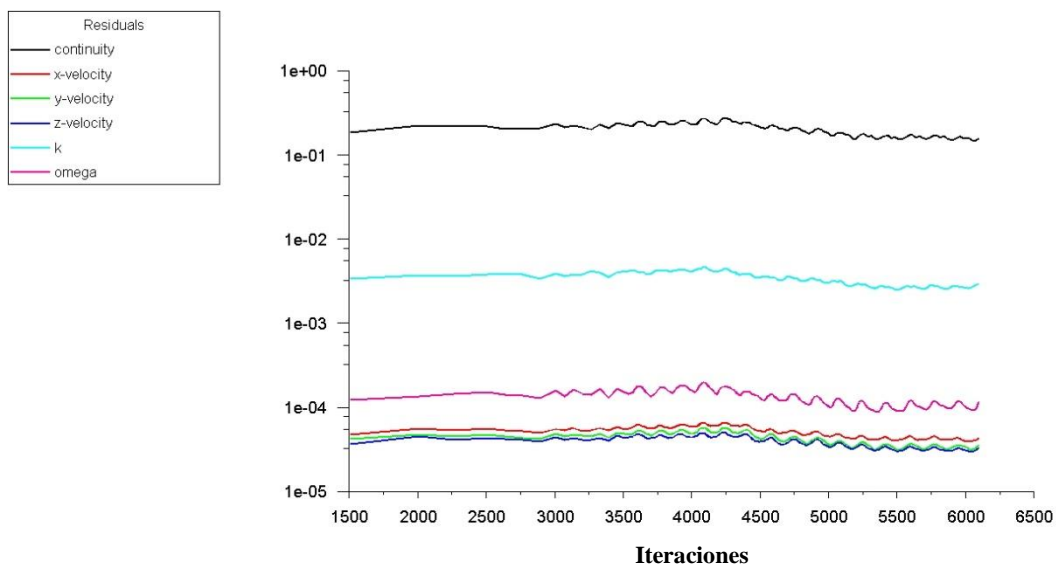


Figura 32. Convergencia del análisis aerodinámico Angulo 30°

4.3 Coeficiente de arrastre

Para el cuerpo de Ahmed con ángulo de 5° se obtuvo que el coeficiente de arrastre es de 0,28. de acuerdo con la figura 33 se aprecia cómo se llega a la estabilidad del valor después de las 1800 iteraciones.

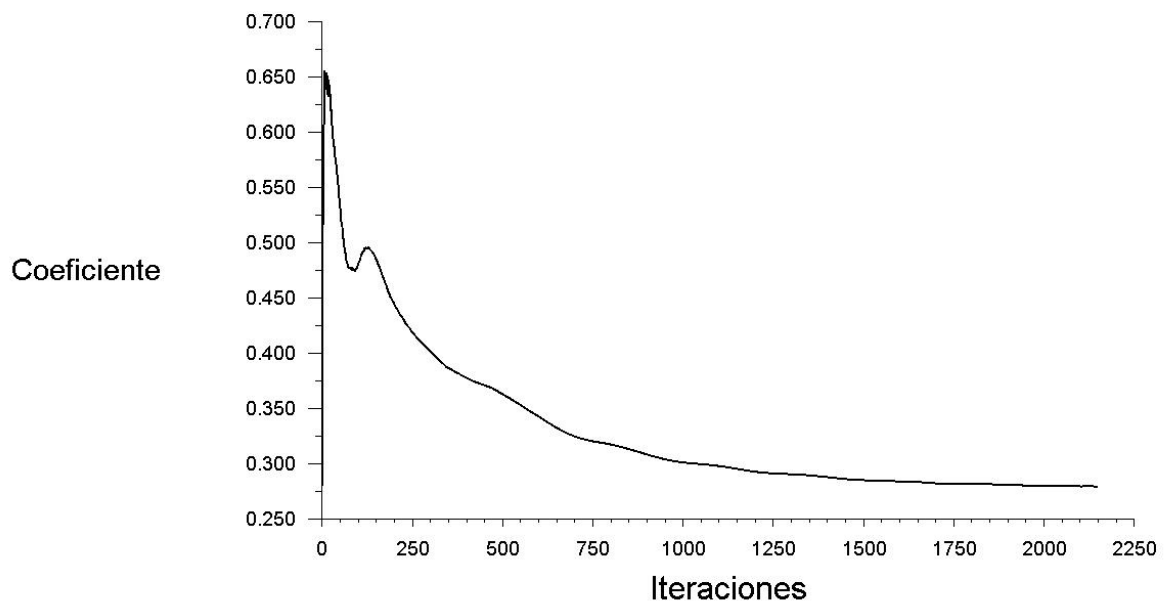


Figura 33. Coeficiente de arrastre para el ángulo de 5°

En la figura 34 se muestra el coeficiente de arrastre para el ángulo de $12,5^\circ$ dando un valor de 0,28. Se debió asignar un mayor número de iteraciones en comparación con el ángulo de 5° para lograr una convergencia en el resultado.

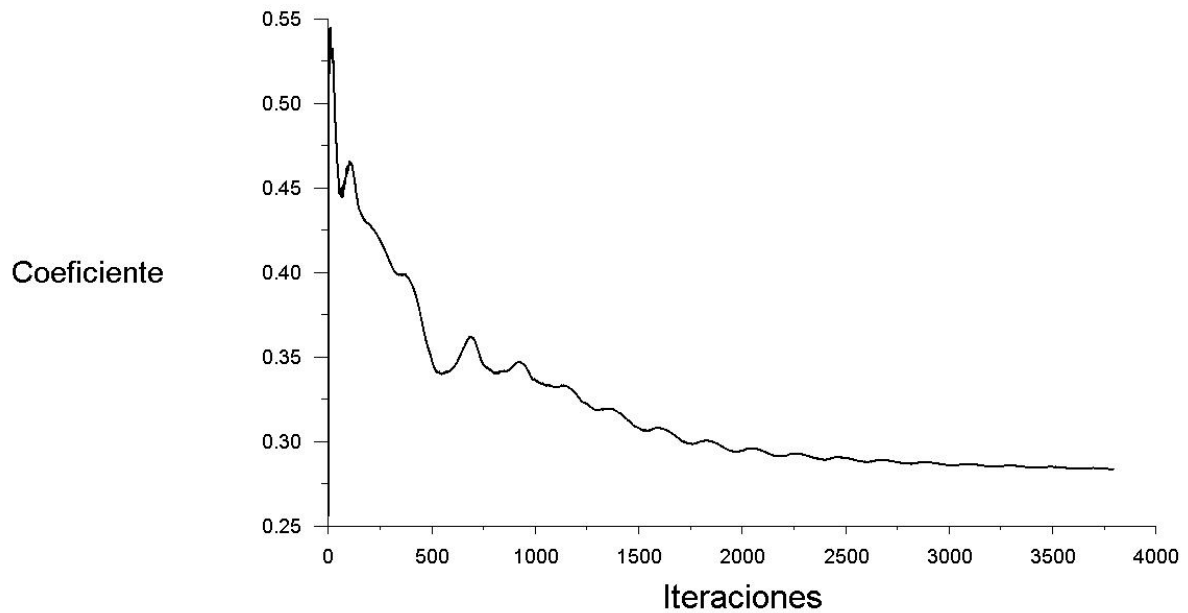


Figura 34. Coeficiente de arrastre para el ángulo de $12,5^{\circ}$

En la figura 35 se puede observar el coeficiente de arrastre del alfiler de 30° , en este caso se realizaron más interacciones que en los casos anteriores para llegar a un valor aproximado de coeficiente de arrastre, se puede notar una tendencia a converger.

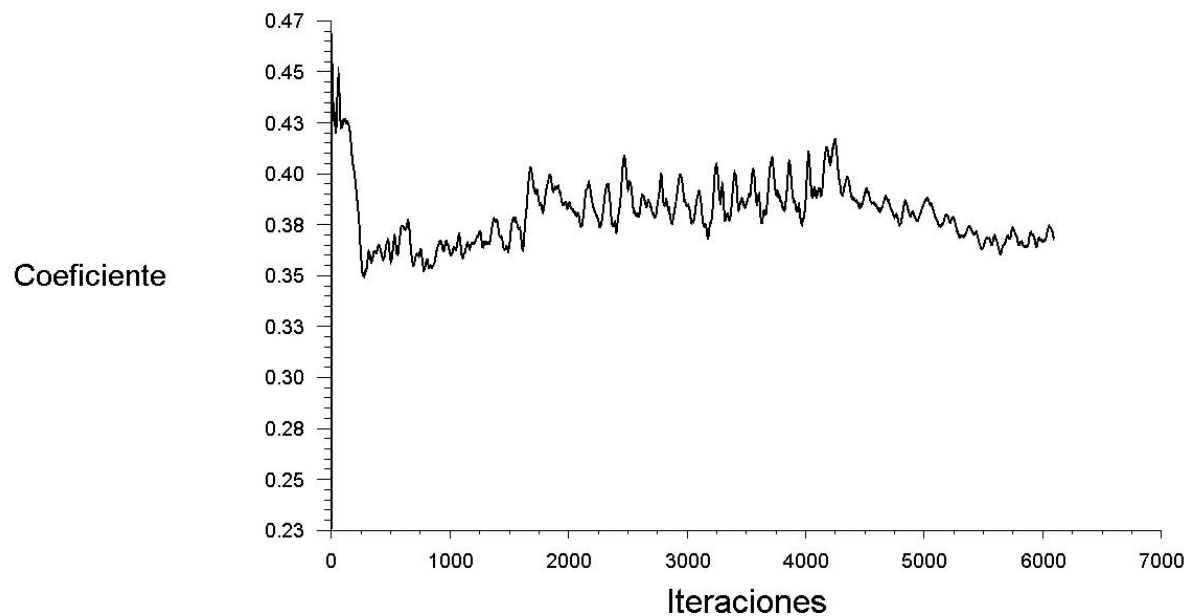


Figura 35. Coeficiente de arrastre para el ángulo de 30°

4.4 Contornos de presión

En las figuras 36, 37 y 38 se muestran la distribución de presión de los tres ángulos, donde se apreciar el comportamiento de la presión total sobre la superficie. En cada uno de los casos se denota la presión máxima y la presión mínima que se registró.

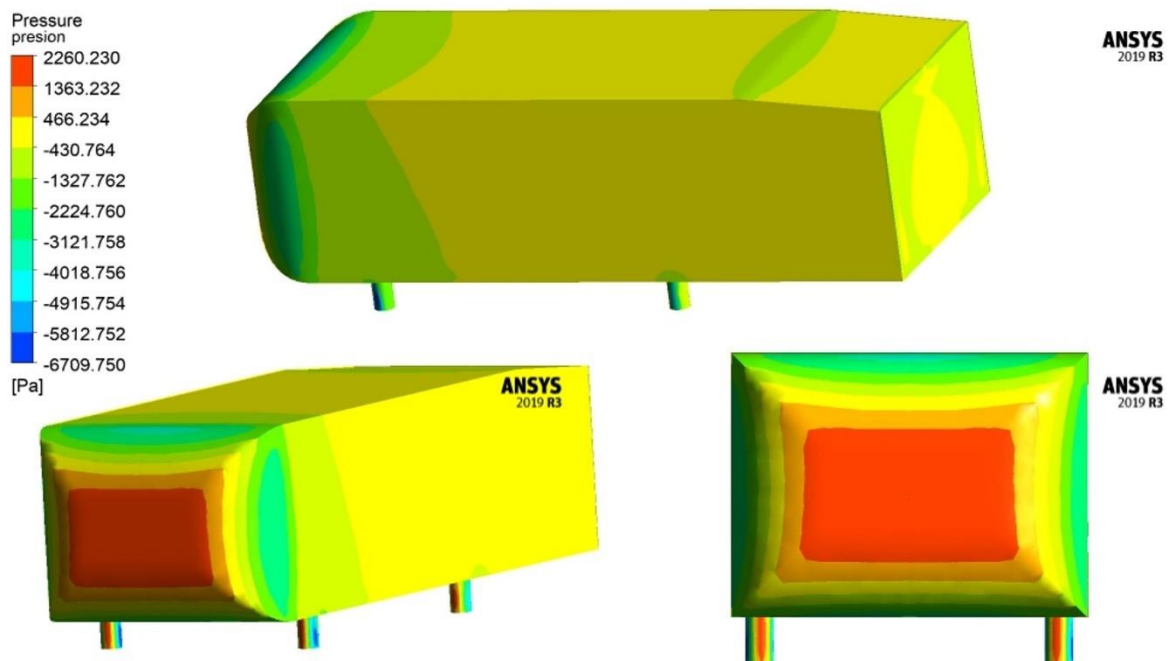


Figura 36. Distribución de presión en el vehículo de ángulo 5°

Para el ángulo de 5° se registró una presión máxima de 2,260 MPa y una mínima que produjo presión de vacío de -6,709 MPa ambas localizadas en los soportes delanteros del cuerpo.

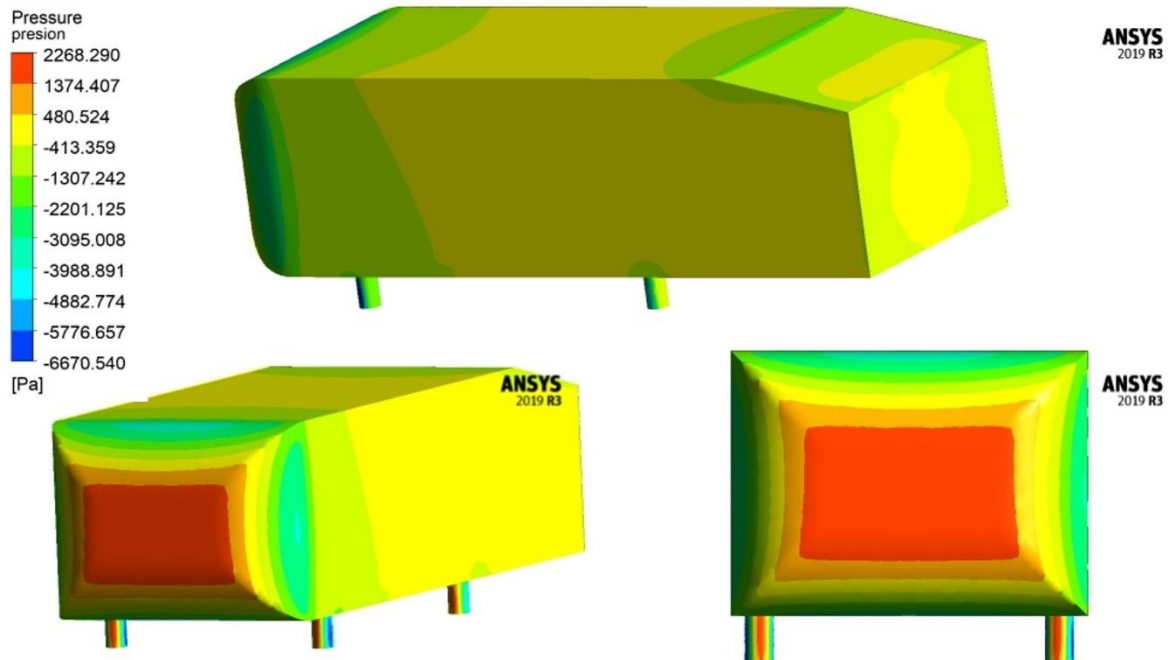


Figura 37. Distribución de presión en el vehículo de ángulo 12,5°

Para el ángulo de 12,5° aumentó la presión en 8 Mpa respecto del ángulo de 5°, se puede observar que la presión máxima y mínima son de 2,268 MPa y -6,670 MPa respectivamente, al igual que en el caso anterior, estas presiones se dieron en los soportes del cuerpo.

En la figura 38 se puede observar los contornos de presión para el ángulo de 30°. Como se puede apreciar la mayor presión que se ejerce sobre el cuerpo es de 2,278 MPa y una presión mínima de -6,779 MPa, igualmente que, en los dos casos anteriores, estas presiones fueron generadas en los soportes del cuerpo.

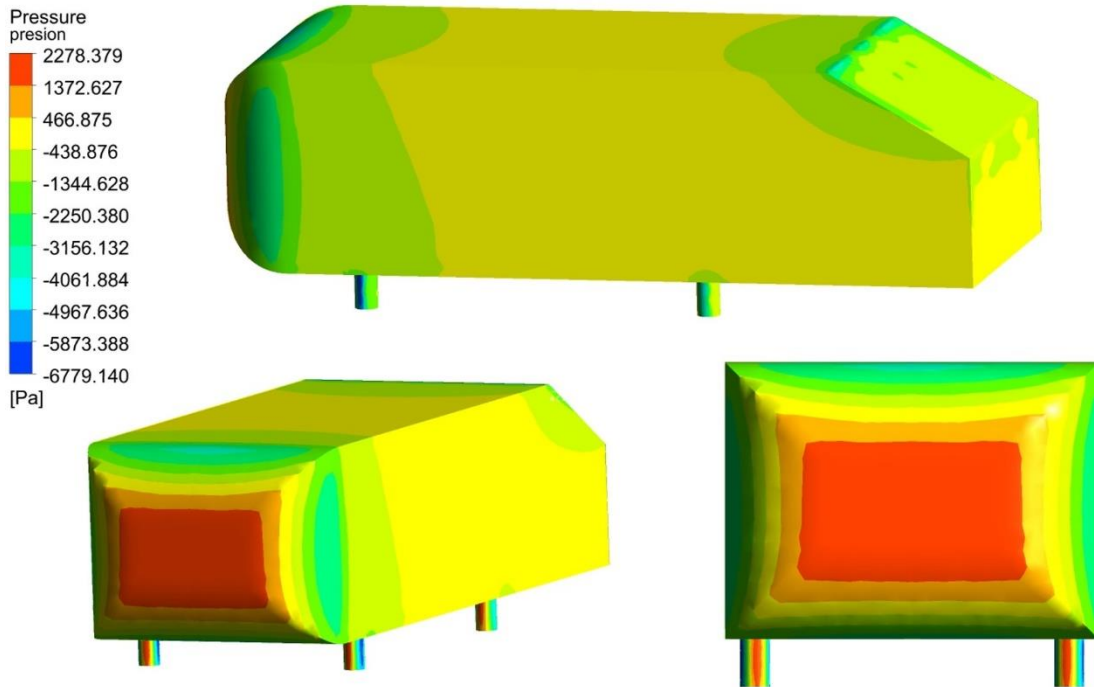


Figura 38. Distribución de presión en el vehículo de ángulo 30°

En las figuras 39, 40 y 41 se observan los contornos de presión alrededor del vehículo, se puede apreciar como aumenta la zona de baja presión en la parte superior de la superficie inclinada a medida que se aumenta el Angulo. También cabe anotar el aumento de la presión en la parte trasera donde se presentan los vórtices de la estela.



Figura 39. Contorno de presión del vehículo ángulo 5°



Figura 40. Contorno de presión del vehículo ángulo 12,5°



Figura 41. Contorno de presión del vehículo ángulo 30°

4.5 Campo de velocidades

En la figura 42 y 43 se presenta el campo de velocidades del ángulo de 5° obtenido a través de la simulación de convergencia numérica sobre el plano de simetría. En la figura 41 se evidencia la zona de estancamiento en la parte delante del vehículo generado por la colisión del aire contra este, donde se presentan los vórtices se observar bajas velocidades y zonas de estancamiento del fluido, en la figura 42 se pueden observar detalladamente.

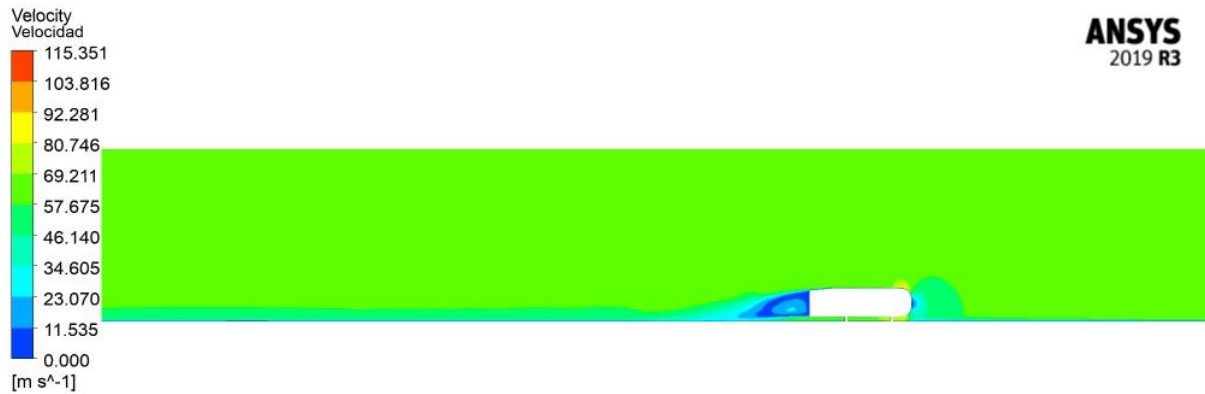


Figura 42. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de 5°

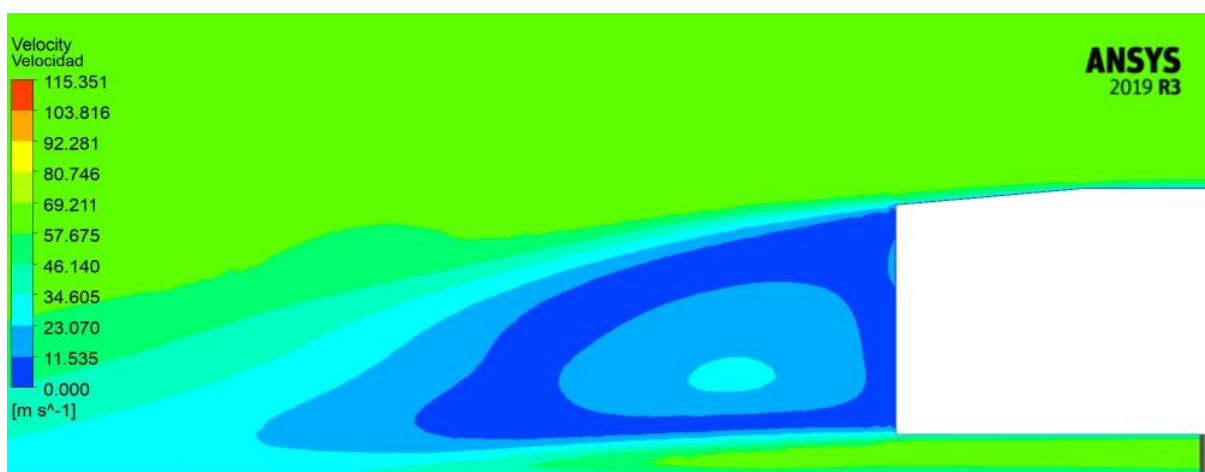


Figura 43. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo

En las figuras 44 y 45 se pueden observar los contornos de velocidad del vehículo con ángulo de salida de 12,5°, como se observa en la figura 43 se presenta la zona de estancamiento en la parte frontal producida por la colisión del aire, en la parte trasera del vehículo se evidencia la zona de baja velocidad donde se producen los vórtices.



Figura 44. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de 12,5°

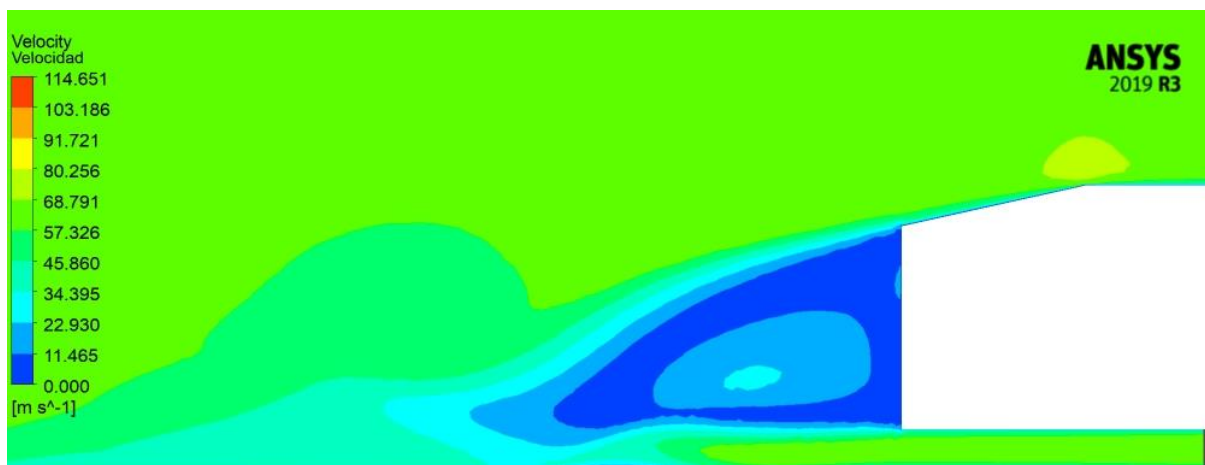


Figura 45. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo

En la figura 46 y 47 se observa el vehículo con ángulo de 30°. Al igual que en los dos ángulos anteriores, se puede evidenciar que en la parte delantera se presenta la zona de estancamiento en cambio en la parte trasera se nota una disminución en los vórtices, pero al tener un ángulo más pronunciado hay mayor desprendimiento en la capa límite provocando que aumente el coeficiente de arrastre.



Figura 46. Campo de velocidades del vehículo con ángulo de salida de 30°



Figura 47. Vista detallada del campo de velocidades en el plano de simetría sobre el vehículo

4.6 Resultados comparativos

Tomando como referencia los resultados experimentales obtenidos por Ahmed [2] se comparó con los obtenidos en la simulación aerodinámica del vehículo.

En la tabla 7 se observa los datos obtenidos físicamente por Ahmed y los arrojados en la simulación aerodinámica.

Tabla 7. Valores comparativos

Ángulo de inclinación	Cd Teórico	Cd vehículo analizado	Porcentaje de error relativo (%)
5°	0,231	0,279	20,7
12,5°	0,230	0,283	23,0
30°	0,378	0,368	2,7

El porcentaje de error comparativo entre los datos de la simulación y los experimentales son debido a que cada vez que la inclinación del vehicula aumenta, se generan vórtices en la parte trasera del vehículo dificultando la estabilidad en los cálculos arrojados por el software, también, el mallado, modelo de turbulencia y numero de iteraciones realizadas, contribuyen a que se presente diferencia en los resultados.

El porcentaje de error para el ángulo de 30 es mínimo, pero al ver la figura 34 del coeficiente de arrastre se puede observar que la simulación no llegó a una convergencia deseada, para mejorar una estabilidad en los resultados se puede cambiar los parámetros seleccionados en la simulación o mejorar el refinamiento de la malla teniendo en cuenta las capacidades computacionales.

En la figura 48 se ve el comportamiento del flujo alrededor del vehículo mostrando primeramente los contornos de presión y seguidamente los contornos de velocidad para cada ángulo de inclinación, en esta figura comparativa se observa como en la parte superior de la cara inclinada se presenta una zona de baja presión producida por la separación de la capa limite afectando la velocidad del viento en la estela producida.

Los que se busca con esta comparación es mostrar como aumenta la zona de separación de la capa limite a medida que el ángulo de inclinación también aumenta y como afecta esto a la generación de turbulencia en la parte trasera vista en los contornos de velocidad.

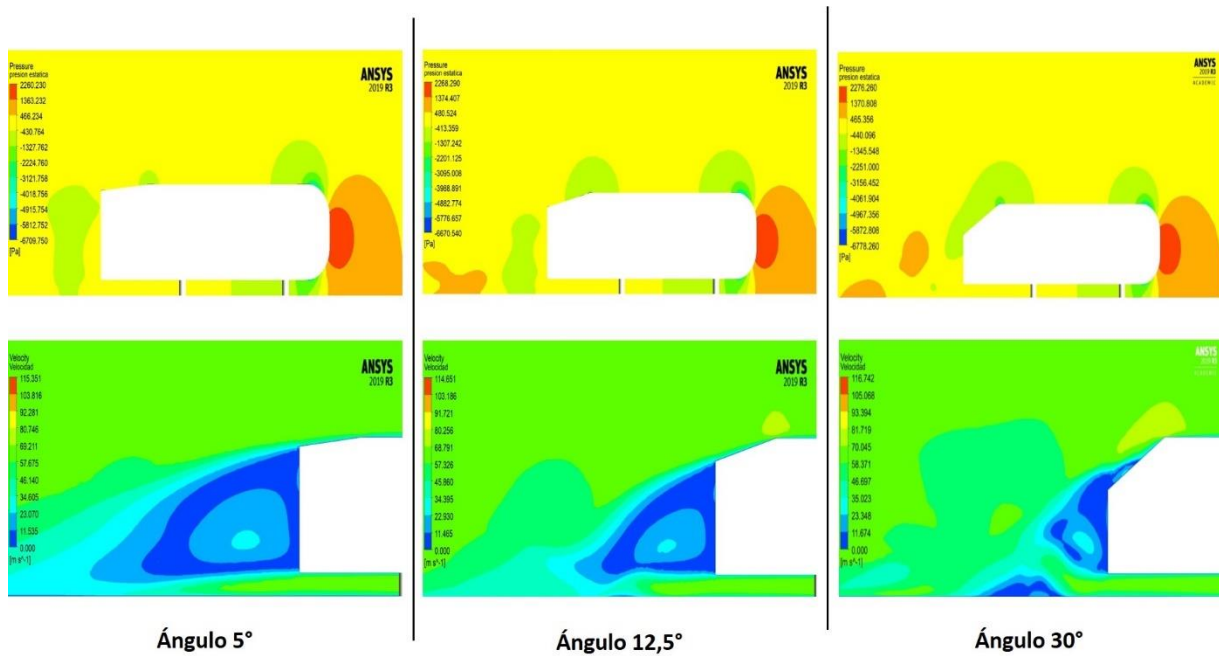


Figura 48. Comparación entre contornos de presión y campos de velocidad

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La recopilación de conceptos relacionados con aerodinámica y dinámica de fluidos computacional permitió reconocer los parámetros que definirían el arrastre del vehículo para los casos estudiados. Además, el estudio del comportamiento de la capa límite aerodinámica y modelos de turbulencia facilitaron la configuración y análisis del modelo.
- En primer lugar, como se ve reflejado en los resultados del estudio, la evolución en el diseño de la carrocería de los automóviles con el paso del tiempo se enfoca a la búsqueda de cuerpos más aerodinámicos, con la finalidad de reducir la resistencia al avance y mejorar la estabilidad, la adherencia al suelo, la eficiencia y el consumo de combustible.
- El enmallado del dominio computacional generado con diversas características no es suficiente para garantizar una simulación exitosa en cualquier ámbito de CFD, por ello es recomendable realizar una serie de refinamientos con variedad de parámetros en las diferentes áreas de interés, con el propósito de mejorar la confiabilidad de resultados y a su vez permitir captar de una mejor manera los diversos fenómenos producidos y en adición.
- En términos generales, podemos concluir que el uso de herramientas computacionales facilita el estudio de los fenómenos naturales, ampliando el análisis bajo diferentes condiciones, y reduciendo en gran medida tiempo y costes de investigación. No

obstante, la realización de ensayos experimentales con modelos reales que verifiquen los resultados obtenidos sigue siendo de vital importancia.

5.2 Recomendaciones

- Es recomendable para trabajos futuros experimentar con otros modelos de turbulencias que se adapten mejor al fenómeno en estudio, cambiar las condiciones de frontera o mallas más refinadas.
- Utilizar diferentes herramientas de CFD por ejemplo CFX de ANSYS y realizar una comparación con los datos obtenidos y experimentales.
- Estudiar otros modelos simplificados en el contexto automotriz, que permitan mejorar el comportamiento aerodinámico y la fabricación de vehículos.
- Desarrollar un proyecto donde se puedan obtener datos experimentales del cuerpo de Ahmed y compararlos con los resultados obtenidos en la simulación y también corroborar los datos dados por Ahmed en su estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. J. Janssen and W. H. Hucho. Aerodynamische formoptimierung von vw golf und vw scirocco, Natl. Acad. Sci. Eng. Med., vol. 77, no. 11, pp. 309–13, 1975.
- [2] S. Ahmed and G. Faltin. Somme salient features of the time-averaged ground vehicle wake, SAE Trans., vol. 93, no. Section 2: 840222—840402, pp. 473–503, 1984.
- [3] C. G. Maria A. Analisis aerodinámico mediante dinámica de fluidos computacional de un vehiculo eléctrico utilitario, universidad tecnológica de pereira, 2018.
- [4] M. J. Kroes, J. R. Rardon, and M. S. Nolan. Aircraft Basic Science. 8 ed. New York: The McGraw-Hill, 2013.
- [5] J. M. Saleh. Fluid Flow Handbook. New York: McGraw-Hill Education, 2002.
- [6] B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, and A. P. Rothmayer, Fundamentals of Fluid Mechanics Seventh Edition, 7 ed. John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [7] A. M. Sadegh and W. M. Worek. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, 12 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [8] A.C. Anderson. Notas de clase, Mecánica de fluidos, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [9] W. Frank M., Fluid mechanics. 9 ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

-
- [10] A. Brij N. and P. Max F. Standard Handbook for Aerospace Engineers, 2 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [11] L, Marco. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent, Germany: Fluent Deutschl. GmbH, 2005.
- [12] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Meshing User's Guide, 2015.
- [13] ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Fluent: Best Practice Guidelines, 2016.
- [14] V., Alcázar and G., Manuel. Influencia de la calidad de malla y MDE en la simulación multifásica 3D del flujo del río Guadalquivir. Escuela Politécnica Superior (Jaén), 2017.
- [15] ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Fluent: Setting Up Physics, 2017.
- [16] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Tutorial Guide, no. November, 2013.